

Trabajo Fin de Máster

## **Máster Universitario en Ingeniería Industrial**

# **Diseño y estudio de la instalación eléctrica de una planta química**

### **MEMORIA**

**Autor:** Xavier Fernàndez Torm  
**Director:** Luis Sainz Sopera  
**Convocatoria:** Junio 2020



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resumen

La fase de diseño de una instalación industrial y su posterior etapa de construcción son las bases que determinan el éxito o no de la puesta en marcha de la misma. Este proyecto intenta centrarse en la etapa inicial de diseño de una planta de producción, para hacer un posterior estudio de sus armónicos y así comprobar si estos pueden tener impacto alguno o no.

Concretamente la planta industrial se ubicaría en Hadjout, Wilaya de Tipaza (Argelia) y estaría pensada para la producción de levadura para panificación.

La idea de este proyecto, es hacer un primer pre dimensionado de la instalación eléctrica de una planta industrial de producción de levadura, haciendo una primera presentación de las cargas eléctricas para un posterior cálculo de cables usando un software de cálculo específico. Una vez introducidos los detalles eléctricos de la instalación, la segunda parte del proyecto consiste en la programación de un software de cálculo para el análisis de la penetración armónica en la instalación. Dicha instalación contiene un alto porcentaje de electrónica de potencia, y por lo tanto la hace susceptible de presentar problemas asociados con la presencia de armónicos.

Para el pre dimensionado de la instalación se usa un programa llamado Caneco BT. Es un programa apoyado por empresas tan reconocidas en el sector eléctrico como podría ser Schneider y que usan múltiples ingenierías.

Para el estudio de armónicos que es la parte más específica del proyecto, se usa un programa hecho a medida por el estudiante bajo entorno Matlab. El trabajo está centrado en conseguir simplificar la instalación en un ejercicio sencillo y fácil de analizar, programar la penetración de armónicos en la instalación simplificada y verificar si la calidad del suministro eléctrico relativo a los armónicos es aceptable.

Finalmente, con el estudio realizado se proponen una serie de mejoras para paliar el efecto de los armónicos que por un lado, están fuera de la normativa vigente y por otro pueden causar múltiples problemas en la instalación.

# Sumario

<b>SUMARIO</b>	<b>4</b>
<b>1. PREFACIO</b>	<b>7</b>
1.1. Origen del proyecto.....	7
1.2. Motivación.....	7
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
2.1. Objetivos del proyecto .....	9
2.2. Alcance del proyecto.....	10
<b>3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b>	<b>12</b>
3.1. Bases de estudio .....	12
3.2. Descripción del Proceso .....	12
<b>4. INSTALACIÓN ELÉCTRICA</b>	<b>17</b>
4.1. Suministro MT .....	17
4.2. Instalación de BT .....	19
4.2.1. Características de la instalación .....	19
4.2.2. Cables.....	19
4.2.3. Rendimientos de los motores eléctricos .....	21
4.2.4. Cable de tierra .....	21
4.2.5. Ampacidad y Coeficientes de reducción de los cables de potencia .....	22
4.2.6. Armario eléctrico TGBT-01 .....	23
4.2.7. Armario eléctrico TGBT-02 .....	26
4.2.8. Armario eléctrico TGBT-03 .....	28
4.2.9. Armario eléctrico TGBT-04 .....	28
4.2.10. Armario eléctrico TGBT-05 .....	29
4.2.11. Compensación de Potencia Reactiva .....	30
<b>5. DIMENSIONADO ELÉCTRICO</b>	<b>33</b>
5.1. Densidad de corriente.....	33
5.2. Caída de tensión.....	34
5.3. Resultados .....	35
<b>6. ARMÓNICOS</b>	<b>37</b>
6.1. Origen; Cargas no lineales .....	37
6.1.1. Variadores de velocidad.....	38
6.1.2. Arrancadores progresivos .....	38
6.2. Caracterización de los armónicos.....	39
6.2.1. Tasa de Distorsión armónica (THD).....	39
6.2.2. Tasa de distorsión armónica individual.....	40

6.3.	Efectos de los armónicos sobre las cargas .....	41
6.4.	Mitigación de los armónicos.....	42
6.4.1.	Filtros Activos .....	43
6.4.2.	Filtro Pasivo .....	43
6.4.3.	Desplazamiento de la frecuencia de resonancia.....	44
<b>7.</b>	<b>MODELIZACIÓN DE LA INSTALACIÓN Y RESULTADOS</b> .....	<b>46</b>
7.1.	TGBT-03 / TGBT-04 .....	47
7.1.1.	Caracterización de la red .....	47
7.1.2.	Caracterización del transformador.....	48
7.1.3.	Caracterización de las cargas lineales (CL) .....	48
7.1.4.	Caracterización de las cargas no lineales (CNL) .....	49
7.1.5.	Caracterización de la batería de condensadores .....	50
7.1.6.	Circuito – $Z_{\text{thevenin}}$ .....	50
7.1.7.	Resultados.....	51
7.2.	TGBT-01 .....	53
7.2.1.	Simplificación del circuito eléctrico.....	53
7.2.2.	Circuito – $Z_{\text{thevenin}}$ .....	54
7.2.3.	Resultados.....	55
7.3.	TGBT-02.....	57
7.3.1.	Simplificación del circuito eléctrico.....	58
7.3.2.	Circuito – $Z_{\text{thevenin}}$ .....	59
7.3.3.	Resultados.....	60
<b>8.</b>	<b>VALORACIÓN DE SOLUCIONES</b> .....	<b>63</b>
8.1.	TGBT-03 / TGBT-04 .....	63
8.1.1.	Filtro pasivo .....	63
8.1.2.	Filtro activo .....	67
8.2.	TGBT-01 .....	69
8.2.1.	Filtro pasivo .....	69
8.2.2.	Impacto en el transformador .....	72
8.3.	TGBT-02.....	74
8.3.1.	Filtro pasivo .....	74
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>78</b>
	<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>81</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>82</b>
	Referències bibliogràfiques.....	82

# 1. Prefacio

Hoy en día se dispone información de todo y al instante. Se puede decir que somos una generación bastante informada de muchos temas, y cuando algo se desconoce y se desea conocer más cosas sobre ello, solo se tiene que buscar en el lugar más adecuado.

Aún así, hay ciertos temas que siempre son difíciles de entender en todos los campos del conocimiento, y el campo de la ingeniería eléctrica no es una excepción. Actualmente hay cálculos a nivel industrial que si no fueran acompañados de un buen programa de cálculo o un software de simulación serían muy sofisticados y laboriosos de llevar a cabo.

Este trabajo pretende dilucidar este ejemplo con dos cálculos muy diferenciados: dimensionado eléctrico y estudio de armónicos. El primero es fácil, incluso profesionales de bajo rango se atreven a realizar y muchas veces con un documento Excel se puede llevar a cabo muy bien, y el segundo que requiere más conocimientos eléctricos y físico-matemáticos.

## 1.1. Origen del proyecto

El origen del proyecto surge sobretodo del interés por el mundo del diseño de instalaciones industriales de todo tipo pero muy en concreto por el área eléctrica y de automatización y control. Esto combinado con la posibilidad de formar parte de un equipo de ingenieros, en una empresa que realiza proyectos de cierta envergadura y tiene que hacer frente a situaciones diversas, ha llevado a la idea y luego la posterior realización de este proyecto.

## 1.2. Motivación

En el máster de ingeniería industrial de especialidad eléctrica, se imparten muchos conocimientos y se explican muchos fenómenos que aparecen en instalaciones eléctricas de todo tipo. Un buen ejemplo, sería el estudio de armónicos o el estudio de flujo de cargas presentados en las asignaturas de “Mètodes i Tècniques de l’Anàlisi de l’Enginyeria Elèctrica” i “Sistemes Elèctrics” respectivamente.

Muy frecuentemente si surgen problemas relacionados con los mismos, se suelen detectar cuando la instalación ya está funcionando y no en la fase de diseño, y muchas veces tienen consecuencias extremas tales como que la instalación no pueda operar correctamente. Aunque cabe decir, que son muy pocos los casos en que estos fenómenos se hacen visibles y es necesario revertirlos, pero cuando estos aparecen acaban siendo un

quebradero de cabeza que obliga a utilizar analizadores de redes y elementos de coste muy elevado.

Por ese motivo, las motivaciones que derivan de este proyecto son las siguientes:

- Coger parte del conocimiento teórico adquirido en las asignaturas de especialidad eléctrica y hacer el ejercicio de conseguir llevarlo a la práctica con un caso real.
- Llegar a conocer si fuera necesario las medidas que se pueden implementar para lograr las soluciones adecuadas.
- Entender la importancia de los fenómenos a estudiar y quizás el motivo por el cual no suelen ser estudiados de manera numérica y algunas veces son ampliamente desconocidos.
- Conseguir confeccionar un método sencillo y fácil de entender para el estudio de armónicos de manera numérica y fácilmente utilizable en el mundo de la empresa sin necesidad de ningún software de simulación específico.
- Conocer más sobre instalaciones industriales que vaya más allá del dimensionamiento de cables y protecciones eléctricas.



## 2. Introducción

El dimensionado eléctrico, igual que el estudio de la calidad eléctrica de una instalación, desarrolla un papel fundamental en cualquier proyecto de ingeniería eléctrica y es esencial para controlar, minimizar las pérdidas de potencia y garantizar un mantenimiento eficaz de los equipos.

La expansión de la electrónica de potencia además, ha provocado un aumento significativo de las cargas no lineales en los diferentes tipos de instalaciones que existen. Las mismas contaminan con corrientes armónicas las instalaciones distorsionando las tensiones y causando un mal funcionamiento de los diferentes elementos que constituyen las instalaciones.

En instalaciones de cierta envergadura como es este proyecto, se necesitan de herramientas informáticas, que mediante la programación, faciliten y hagan los cálculos tanto de dimensionado como de análisis de armónicos más ágiles. En este proyecto se usan dos herramientas o entornos de cálculo muy potentes: Microsoft Excel y Matlab. La complementación de estas dos herramientas permite conseguir resultados sin que la capacidad de cálculo sea un problema.

Todo con el fin de intentar no sobredimensionar la instalación i la optimización de la calidad eléctrica. Entendiendo calidad eléctrica como una gestión más eficiente de los recursos energéticos y que los valores de las tensiones y las corrientes mantengan sus características aceptables para el correcto funcionamiento de la instalación.

### 2.1. Objetivos del proyecto

Los objetivos principales de este proyecto son:

- **Hacer un dimensionado eléctrico de una instalación eléctrica de una cierta envergadura utilizando un documento Excel.**
- **Hacer un estudio numérico de armónicos con un programa propio, desarrollado bajo el entorno Matlab, de la instalación estudiada i proponer mejoras en el caso de que fuera necesario.**

Estos dos serían los objetivos esenciales en la realización del proyecto pero hay otros objetivos que suponen un reto también:



- **Presentar la instalación de manera que a nivel eléctrico resulte útil.** Conseguir reflejar cómo es la instalación, resultará muy útil para su posterior rápido dimensionado y el estudio de armónicos.
- **Conseguir programar un documento Excel que permita sacar resultados coherentes a nivel de dimensionado eléctrico y ser crítico con los resultados que se extraigan.** El dimensionado eléctrico se limitará solamente al dimensionado de los conductores eléctricos, ya que se le quiere dar más prevalencia a la parte de estudio de armónicos.
- **Aprender un poco más a usar el Matlab para el estudio de armónicos.** Es un programa muy potente que ayuda en la realización de cálculos muy pesados a hacerlos con rapidez. Aún así, se debe tener conocimientos y un cierto criterio para verificar que estén bien los cálculos.
- **Conseguir simplificar un caso real en un ejercicio similar a los que se hacen en clase para su análisis de armónicos.** En el cálculo de armónicos la intención es coger un caso de la vida real y convertirlo en un caso académico. Este proceso de conversión, supone conocer bien el problema armónico y su caracterización y modelización con el objeto de que las simplificaciones realizadas, no tengan impacto o que este sea el mínimo posible.
- **Poder profundizar un poco más en reglamentos y normativas existentes.** Muchas veces las normas existentes son cambiantes y de costoso acceso, e incluso pueden resultar pesadas a su lectura y comprensión. Una buena manera de esquivar esta parte más laboriosa es ir a los catálogos de fabricantes, dónde aparte de sus productos hay mucha información a nivel de normativas ya simplificada y referenciada convenientemente.
- **De los conocimientos adquiridos en el máster sobre armónicos, ampliar los conocimientos básicos sobre armónicos y proponer posibles soluciones para mitigar los problemas asociados a los mismos.**

## 2.2. Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto es por un lado intentar hacer una primera parte de dimensionado eléctrico de una instalación industrial de cierta envergadura, que podría servir como primera radiografía si un cliente viniera a informarse y estuviera interesado en abrir una planta de producción por ejemplo es este proyecto, una planta de levadura con capacidad de producción de 36000Tn/año. Esta primera documentación le serviría para



sacar una primera nota de gastos que tendría, ya que los equipos más caros ya vienen recogidos en este “ante-proyecto” y le serviría como idea (al menos solo a nivel eléctrico).

Este dimensionado eléctrico sería el único dimensionado de cables eléctricos.

En cuanto a la segunda parte del proyecto, el alcance consiste en hacer un primer estudio de posibles armónicos en esta instalación. El método es un método absolutamente numérico y teórico. Para llevarlo a cabo correctamente, se basará el estudio teniendo en cuenta características técnicas reales de fabricante. De esta manera, al disponer de datos reales, y no de suposiciones o aproximaciones, dará como resultado del análisis de armónicos y la simplificación un escenario bastante realista. Este análisis consistiría en:

- Simplificación de la instalación usando los conocimientos eléctricos adquiridos en el máster.
- Modelización frecuencial del sistema.
- Programación del procedimiento para el estudio de la penetración armónica en la instalación.
- Análisis de resultados
- Proponer posibles soluciones que el problema armónico.

## 3. Descripción del Proyecto

### 3.1. Bases de estudio

Los dos estudios que se van a realizar necesitan basarse en un proyecto verosímil y con una cierta coherencia. En este caso estarán basados en el ante-proyecto de una nueva planta de producción de levadura fresca para la Empresa Allequipment en Argelia.

El emplazamiento de la planta de producción es en Hadjout, Wilaya de Tipaza. Esta zona tiene las siguientes condiciones climáticas:

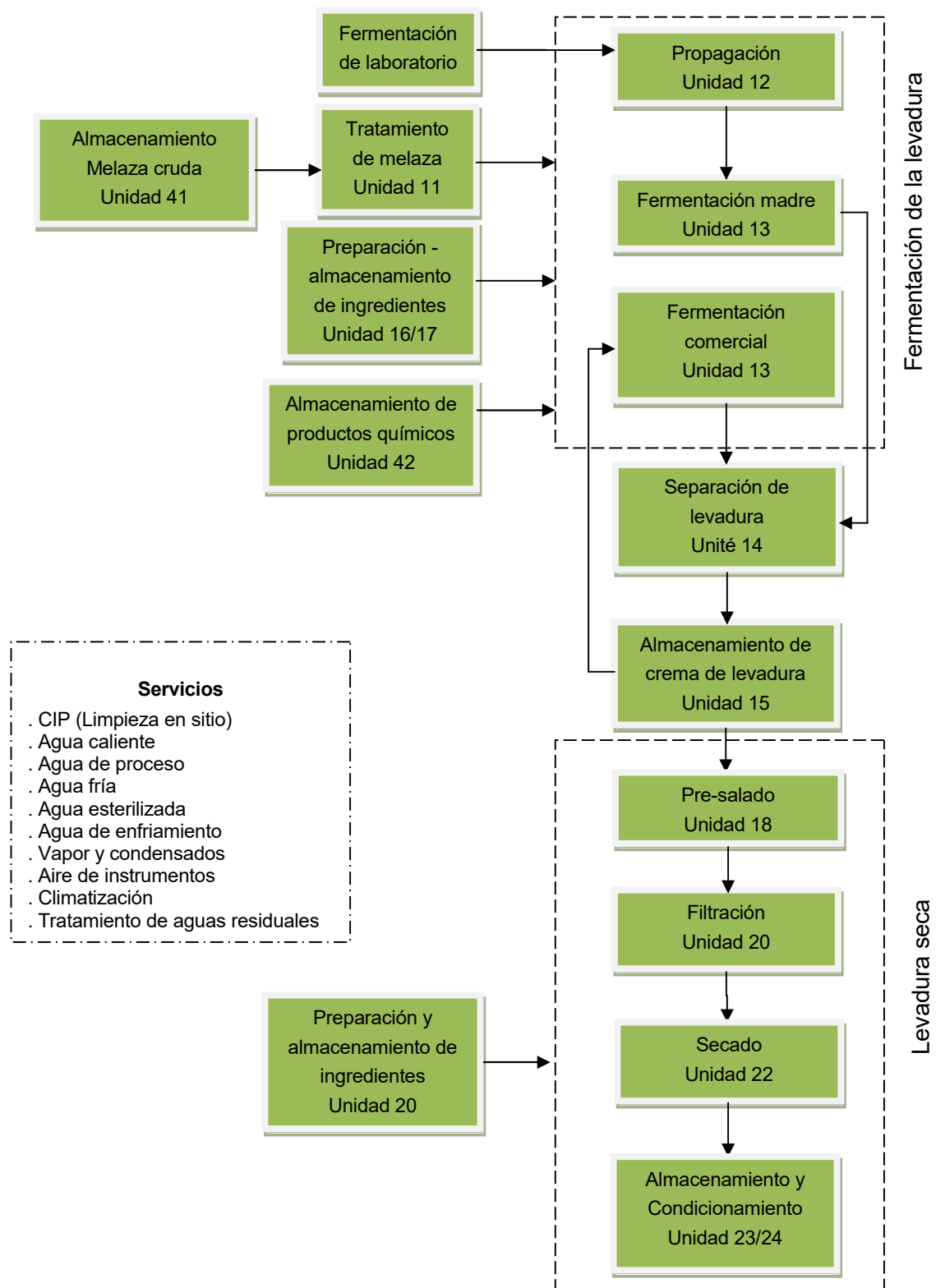
- Temperatura media anual: 23°C
- Temperatura máxima media anual: 30°C
- Temperatura mínima anual: 16°C
- Humedad relativa de hasta 100%.
- Velocidad media anual del viento: 12 km/h

Los planos de la parcela y su edificio de producción de la planta a estudiar se adjuntan en el apartado 1.1.

### 3.2. Descripción del Proceso

La actividad consiste en la producción de levadura fresca para panificación.

El procedimiento de fabricación de la levadura fresca está basado en la configuración siguiente:



La levadura es un microorganismo unicelular de aproximadamente una centésima de milímetro de tamaño. Existen varios de tipos de levaduras y por lo tanto de

microorganismos, cada uno con sus propias características específicas (por ejemplo, para la producción de vino o cerveza). Este proyecto está centrado en la levadura para panificación, la cual su nombre científico es «*saccharomyces cerevisiae* ».

La levadura puede vivir de dos maneras: con o sin oxígeno. En presencia de oxígeno y de otras sustancias, tiene la capacidad de multiplicarse por gemación.

La capacidad de producción de la planta de producción a construir es de 36000Tn/año de levadura fresca con una concentración del 32% de materia seca.

- Periodo de operación :  
50 semanas/año  
7 días/semana  
24 h/día (3 turnos/día de producción)

La primera etapa de la fermentación es la fermentación de laboratorio ( $\cong 10$  litros), donde la cepa se transfiere con una jeringa al fermentador de laboratorio.

Una vez el tiempo de fermentación finaliza, el contenido del fermentador del laboratorio es transferido a la primera etapa de la fermentación industrial. Esta última es una fermentación estéril y discontinua conocida como propagación ( $\cong 12$  m<sup>3</sup>). La duración de esta fase de fermentación es aproximadamente de 22 horas.

Acabada la primera fermentación industrial, el contenido de la propagación es transferido a la parte de la fermentación madre ( $\cong 260$  m<sup>3</sup>). Esta etapa es una fermentación de alimentación por lotes (feed-batch) que tiene una duración aproximada de 28 horas.

El producto que resulta del último fermentador se concentra y se lava con separadores centrífugos. A la salida de los separadores la crema de levadura se enfría a una temperatura entre 2 y 4°C y se almacena en los tanques de crema considerada como cultivo de levadura.

Esta levadura se usa como inoculante para el cultivo de fermentación comercial. La fermentación comercial es aprovechada dentro de un fermentador ( $\cong 260$  m<sup>3</sup>) y tiene una durada de 16 horas. La crema de levadura comercial es concentrada y lavada dentro de los separadores y almacenada una vez enfriada dentro de las cubas de crema comercial. La concentración de la crema de levadura es del orden de 20-22% en materia seca.

La instalación tiene 4 fermentadores de 260m<sup>3</sup>, utilizados por las dos fermentaciones, por la madre y la comercial.

La crema de levadura se concentra aún más en un filtro de vacío rotativo, hasta una concentración de alrededor del 32% en materia seca, extruida y envasada en paquetes de 0.5kg. Finalmente, la levadura fresca se almacena en una cámara frigorífica.

Los ingredientes a modo de resumen necesarios para la producción de levadura son:

- Melaza
- Fuente de Nitrógeno
- Fuente de Fósforo
- Sal
- Ingredientes minoritarios
- Antiespumante
- Otros

Estos mismos son preparados y almacenados en tanques donde se transfieren al proceso en el momento adecuado.

La melaza es la principal materia prima utilizada para la producción de levadura. La melaza es un residuo azucarero que contiene del orden entre un 46 y un 50% de azúcar fermentable. Antes de ser introducido en los tanques de fermentación hay que diluirlo en agua y esterilizarlo.

La planta aparte de tener la parte esencial del proceso tiene una serie de servicios auxiliares necesarios para la producción de la levadura. En resumidas cuentas todas las unidades de interés con su breve descripción para los estudios eléctricos son:

- |  |  |
|--|--|
| ➤ <b>U.11:</b> Tratamiento de la Melaza    | ➤ <b>U.42:</b> Almacenamiento productos químicos |
| ➤ <b>U.12:</b> Propagación                 | ➤ <b>U.51:</b> Agua proceso                      |
| ➤ <b>U.13:</b> Fermentación                | ➤ <b>U.52:</b> Agua fría                         |
| ➤ <b>U.14:</b> Separación                  | ➤ <b>U.53:</b> Agua tratada                      |
| ➤ <b>U.15:</b> Almacenamiento              | ➤ <b>U.54:</b> Agua de enfriamiento              |
| ➤ <b>U.16:</b> Preparación de ingredientes | ➤ <b>U.55:</b> HVAC                              |
| ➤ <b>U.17:</b> Almacenamiento ingredientes | ➤ <b>U.58:</b> Vapor y condensados               |
| ➤ <b>U.19:</b> Empaquetado                 | ➤ <b>U.59:</b> Aire de instrumentos              |
| ➤ <b>U.31:</b> CIP                         | ➤ <b>U.61:</b> Tratamiento                       |
| ➤ <b>U.32:</b> Agua caliente               |  |
| ➤ <b>U.41:</b> Almacenamiento melaza       |  |

## 4. Instalación eléctrica

A continuación se presenta la instalación eléctrica a estudiar y los criterios eléctricos para su posterior dimensionado. Básicamente está dividida en media tensión y baja tensión, y entre la zona del edificio de producción y la zona exterior o de “utilities”

### 4.1. Suministro MT

Para alimentar todas las cargas eléctricas de la planta que serán posteriormente presentadas se dispone de un suministro de MT a 30KV y 50Hz. La empresa suministradora es llamada: “Société de Distribution de l'Electricité et du Gaz d'Alger”.

Características técnicas:

- Tensión nominal: 30 kV AC trifásico
- Corriente nominal de las barras principales: 630 A
- Corriente nominal de interruptor-seccionador: 630 A
- Frecuencia nominal: 50 Hz
- Corriente nominal soportada a corto plazo: 16 kA 3s
- Corriente nominal máxima admisible: 40kA
- Capacidad de cierre del interruptor de puesta a tierra: 16kA

Por un lado llegaría el suministro a un primer armario de alta tensión llamado TMT-01 ubicado en la sala eléctrica de las “utilities”. De este armario sale un cable que a la vez va al edificio de producción hasta llegar a unas celdas de alta tensión llamadas TMT-02. Para ver la distribución, ver anexo II. En la Fig. 1 se adjunta un esquema de una de estas celdas.

Las celdas estarán equipadas con las siguientes protecciones:

- Interruptor seccionador con fusibles aislado dentro de SF6.
- Comando mecánico con indicadores de posición.

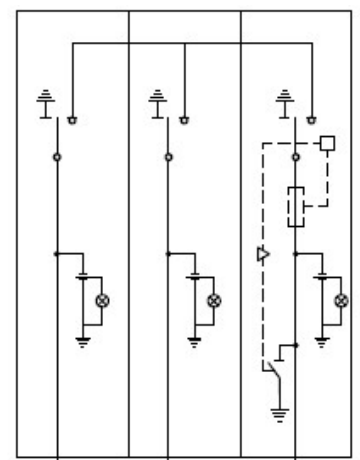


Fig. 1 Esquema celda de MT

- Base para fusibles.
- Indicador de disparo para intervención de fusibles
- Indicadores de presencia de tensión
- Seccionador de tierra

Del TMT-01 se alimenta el transformador número 5 (TR-05) (ubicado en la sala eléctrica de las “utilities”). Y del TMT-02 se alimentan los transformadores número 1 / 2 / 3 / 4 (TR-01 / TR-02 / TR-03 / TR-04) (en el edificio de producción). Tienen las siguientes características:

- Tipo: seco
- Potencia nominal:
  - TR-01: 1600 kVA
  - TR-02: 1600kVA
  - TR-03: 2000kVA
  - TR-04: 2000 kVA
  - TR-05: 2500 kVA
- Número de fases: 3
- Tensión de primario / tensión de secundario: 30000 / 400V
- Refrigeración: AN
- Material de devanado primario / secundario: Al
- Encapsulado de los devanados: resina Epoxy reforzado con fibra de vidrio
- Frecuencia nominal: 50Hz
- Grupo de conexión: Dyn11
- Nivel de aislamiento del devanado primario: LI 125/AC50/Um 24kV
- Nivel de aislamiento del devanado secundario: LI-/AC3/Um 1.1Kv
- Control de temperatura: relés y sondas





- Refrigeración forzada: No
- Instalación: Interior
- Factor de potencia:  $\cos\phi=0.85$
- $\varepsilon_{cc}$ : 8%

## 4.2. Instalación de BT

Como ya se mencionó en apartado anterior, se instalarán 5 transformadores. Cada transformador alimentará uno o más cuadros y a su vez los consumidores finales.

### 4.2.1. Características de la instalación

En Argelia la norma que aplica es la norma francesa (NFC15-100), que está directamente relacionada con la norma europea (IEC 60364). Aún así, ya que el diseño se hace en España y el reglamento español de baja tensión (REBT 2002) está directamente inspirado también con la norma europea el diseño se hará siguiendo la norma española que realmente no difiere tanto de la francesa.

La instalación es trifásica (400V / 50 Hz) y toda la distribución de cables de baja tensión será usando bandejas perforadas. Las cargas, según su ubicación, están clasificadas entre aquellas que se encuentran en el edificio de producción y las que se encuentran en la intemperie y por tanto expuestas a las condiciones meteorológicas. Aquellas que se encuentran en la intemperie son aquellas que son alimentadas por TR-05 y a su vez por TGBT-05 (ver anexo I).

### 4.2.2. Cables

La sección de los cables será determinado usando Microsoft Excel.

Si el cable para alimentar los cuadros y las diferentes cargas son multi-conductores o unipolares, se usará como criterio general que a partir de secciones más elevadas de 150 mm<sup>2</sup>, el programa escoja conductores unipolares siempre.

El cable escogido para todos los consumidores es el polietileno reticulado (XLPE) y libre de halógenos. En el caso de aquellas cargas lineales se usará el cable (RZ1-K). En el caso de cargas no lineales (con variador de frecuencia), el cable usado será con pantalla para asegurar la compatibilidad electromagnética (RZ1KZ1-K) [3].

Los dos cables seleccionados son flexibles y están pensados para alimentación y control.

Están fabricados con conductores de cobre flexibles de clase 5 [3] para facilitar el tendido en instalaciones con cursos sinuosos como es el caso. El revestimiento exterior de baja emisión de humos y sin halógenos da como resultado un cable de alta seguridad y que en caso de incendio no emite gases tóxicos. La naturaleza del conductor en toda la instalación de BT será de cobre.

Las ampacidades máximas de los cables, quedan reflejados en la siguiente tabla extraída de la norma UNE-HD 60364-5-52 y a la vez de un catálogo de un suministrador [3]:

### Intensidades admisibles en amperios al aire (40 °C)

MÉTODO DE INSTALACIÓN TIPO SEGÚN TABLA 52-B2		TIPO DE AISLAMIENTO TÉRMICO (XLPE o PVC) + NÚMERO DE CONDUCTORES CARGADOS (2 o 3) (TEMPERATURA MÁXIMA DE LOS CONDUCTORES EN RÉGIMEN PERMANENTE → 70°C TIPO PVC Y 90°C TIPO XLPE)																	
A1			PVC3 (70 °C)	PVC2 (70 °C)					XLPE3 (90 °C)		XLPE2 (90 °C)								
A2		PVC3 (70 °C)	PVC2 (70 °C)					XLPE3 (90 °C)		XLPE2 (90 °C)									
B1					PVC3 (70 °C)			PVC2 (70 °C)					XLPE3 (90 °C)				XLPE2 (90 °C)		
B2					PVC3 (70 °C)	PVC2 (70 °C)					XLPE3 (90 °C)	XLPE2 (90 °C)							
C								PVC3 (70 °C)				PVC2 (70 °C)			XLPE3 (90 °C)			PVC2 (90 °C)	
D1/D2*		VER SIGUIENTE TABLA																	
E									PVC3 (70 °C)				PVC2 (70 °C)			XLPE3 (90 °C)		XLPE2 (90 °C)	
F											PVC3 (70 °C)			PVC2 (70 °C)		XLPE3 (90 °C)	XLPE3 (90 °C)	XLPE2 (90 °C)	XLPE2 (90 °C)
Cobre	mm²	2	3	4	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b	11	12	13
	1,5	11	11,5	12,5	13,5	14	14,5	15,5	16	16,5	17	17,5	19	20	20	20	21	23	25
	2,5	15	15,5	17	18	19	20	20	21	22	23	24	26	27	26	28	30	32	34
	4	20	20	22	24	25	26	28	29	30	31	32	34	36	36	38	40	44	46
	6	25	26	29	31	32	34	36	37	39	40	41	44	46	46	49	52	57	59
	10	33	36	40	43	45	46	49	52	54	54	57	60	63	65	68	72	78	82
	16	45	48	53	59	61	63	66	69	72	73	77	81	85	87	91	97	104	110
	25	59	63	69	77	80	82	86	87	91	95	100	103	108	110	115	122	135	146
	35	72	77	86	95	100	101	106	109	114	119	124	127	133	137	143	153	168	182
	50	86	94	103	116	121	122	128	133	139	145	151	155	162	167	174	188	204	220
	70	109	118	130	148	155	155	162	170	178	185	193	199	208	214	223	243	262	282
	95	131	143	156	180	188	187	196	207	216	224	234	241	252	259	271	298	320	343
	120	150	164	179	207	217	216	226	240	251	260	272	280	293	301	314	350	373	397
	150	171	188	196	224	236	247	259	276	289	299	313	322	337	343	359	401	430	458
	185	194	213	222	256	268	281	294	314	329	341	356	368	385	391	409	460	493	523
	240	227	249	258	299	315	330	345	368	385	401	419	435	455	468	489	545	583	617
	300	259	285	295	343	360	398	396	432	414	461	468	516	524	547	549	630	674	713
Aluminio	2,5	11,5	12	13	14	15	16	16,5	17	17,5	18	19	20	20	20	21	23	25	
	4	15	16	17	19	20	21	22	22	23	24	25	26	28	27	29	31	34	
	6	20	20	22	24	25	27	29	28	30	31	32	33	35	36	38	40	44	
	10	26	27	31	33	35	38	40	40	41	42	44	46	49	50	52	56	60	
	16	35	37	41	46	48	50	52	53	55	57	60	63	66	66	70	76	82	82
	25	46	49	54	60	63	63	66	67	70	72	75	78	81	84	88	91	98	110
	35				74	78	78	81	83	87	89	93	97	101	104	109	114	122	136
	50				90	94	95	100	101	106	108	113	118	123	127	132	140	149	167
	70				115	121	121	127	130	136	139	145	151	158	162	170	180	192	215
	95				140	146	147	154	159	166	169	177	183	192	197	206	219	233	262
	120				161	169	171	179	184	192	196	205	213	222	228	239	254	273	306
	150					187	196	205	213	222	227	237	246	257	264	276	294	314	353
	185					212	222	232	243	254	259	271	281	293	301	315	337	361	406
	240					248	261	273	287	300	306	320	332	347	355	372	399	427	482
	300					285		313		331		366		400		429	462	494	558

**NOTAS:** con fondo naranja figuran los valores que no se aplican en ningún caso. Los cables de aluminio no son termoplásticos (PVC2 o PVC3), ni suelen tener secciones inferiores a 16 (estos valores no son necesarios). Los valores con fondo azul no figuran en la tabla original. Han sido calculados con los criterios de la propia norma UNE-HD 60364-5-52. Los valores con fondo amarillo no figuran en la tabla original y no es posible calcularlos con la UNE-HD 60364-5-52, por lo que se ha recurrido al método de cálculo de la última versión internacional de la norma IEC 60364-5-52, que curiosamente no ha eliminado el método de cálculo como se ha hecho en la versión UNE-HD.

Tabla 1 Tabla de intensidades admisibles en amperios al aire (40°C). Norma UNE HD-60364-5-52.



Por último cabe tener en cuenta que la mayoría de consumidores son motores y por lo tanto hay que tener en cuenta la ITC-BT-47 dónde dice: “Los conductores de conexión que alimentan a un solo motor deben estar dimensionados para una intensidad del 125 % de la intensidad a plena carga del motor”[8]. Para el resto de consumidores que no sean motores, se tomará el mismo criterio pero en estos casos del 110%. Esto es debido a que muchas veces se desconoce la naturaleza del consumidor y por lo tanto conviene coger un poco de margen.

Otro parámetro a tener en cuenta, se considerará para el dimensionado de cables una máxima caída de tensión en funcionamiento normal (régimen permanente) del 5% entre transformador y el consumidor final. De esta manera, se considera un 2% del transformador al cuadro eléctrico, y del cuadro eléctrico al consumidor final un 3%.

Y por último, se considerará una máxima caída de tensión en el arranque (régimen transitorio) del 15% y un  $\cos\phi=0.3$ . De esta manera se asegura que en especial los motores de arranque directo puedan arrancar con garantías. En el caso de los motores accionados por electrónica de potencia no le aplicará esta restricción. La intensidad de empleo para el cálculo en este caso será la intensidad nominal del consumidor multiplicada por 7, ya que los motores eléctricos de arranque directo experimentan una intensidad de arranque de manera general de 7 veces la corriente nominal.

#### **4.2.3. Rendimientos de los motores eléctricos**

La comisión IEC introdujo un reglamento relativo a la eficiencia de los motores llamado IEC60034-30 (ver anexo III). Esta instalación no queda exenta de cumplir con tal reglamento y por lo tanto hay que tenerlo en cuenta en el dimensionado de la instalación.

Para todos los motores eléctricos de la instalación se considerarán IE2 y por lo tanto sabiendo la velocidad de cada uno (número de polos) y su potencia nominal se les puede asignar un rendimiento. Para aquellos motores de los que no se tenga suficiente información se les aplicará un rendimiento de 90% de manera general.

#### **4.2.4. Cable de tierra**

El esquema de puesta a tierra para todos los armarios eléctricos será TNC-S. En dicho esquema la distribución del conductor del neutro está separada de la del conductor de protección, pero en un inicio el conductor de tierra y el neutro son el mismo conductor.

En cuanto al dimensionado del cable de tierra se tomará como referencia la información que se recoge en la Tabla 2 [1].

Sección de los conductores de fase de la instalación $S$ (mm <sup>2</sup> )	Sección mínima de los conductores de protección $S_p$ (mm <sup>2</sup> )
$S \leq 16$	$S_p = S$
$16 < S \leq 35$	$S_p = 16$
$S > 35$	$S_p = S/2$

*Tabla 2 Relación entre las secciones de los conductores de protección y los de fase.*

#### 4.2.5. Ampacidad y Coeficientes de reducción de los cables de potencia

Según GUÍA-BT-19 – Tabla B [2] (ver anexo IV), el modo de instalación sería de tipo “E” y “F”, y el criterio es aprovechar al máximo el espacio disponible que ofrecen las bandejas. Eso significa que se considerarán el máximo número de circuitos adyacentes y dos capas de cables dentro de bandeja. Revisando la GUÍA-BT-19, en la tabla E y F (ver anexo V) se pueden sacar dos coeficientes que afectaran en la ampacidad final del cable [2].

En cuanto a los coeficientes por temperatura, sabiendo que la temperatura máxima media anual es de 30°C, se considerará una temperatura ambiente de 40°C. Por lo tanto, mirando la tabla 3 se puede considerar que el coeficiente de temperatura sea 1.

Coeficiente	Valor
$K_f$ (agrupamiento de varios circuitos)	0.7
$K_s$ (cables instalados en varias capas)	0.8

*Tabla 3 Coeficientes de agrupamiento*

**TABLA 7 DE ITC-BT 06 Y TABLA A.5 DE UNE 211435 (AMPLIADA)**  
**FACTOR DE CORRECCIÓN PARA TEMPERATURA AMBIENTE DISTINTA DE 40°C**

TEMPERATURA AMBIENTE ( $\theta_a$ ) (°C)										
10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1,27	1,22	1,18	1,14	1,10	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,77



*Tabla 4 Coeficientes por temperatura ambiente. Fuente: Catálogo de Prysmian.*



Para aquellas cargas que se encuentren fuera del edificio de producción y por lo tanto al intemperie, las normas de la serie UNE 20.435 [1] recomiendan que en aquellas zonas que la radiación solar sea muy fuerte, se deberá tener en cuenta el calentamiento de la superficie de los cables con relación a la temperatura ambiente, por lo que en estos casos se aplica un factor de corrección de 0.9 o inferior. En este caso, se aplicará 0.9.

En resumidas cuentas, para aquellas cargas que estén en el edificio de producción y para las que estén en el exterior, la ampacidad del cable se verá condicionada por el siguiente coeficiente total:

Coeficientes totales	Valor total
$K_T$ (edificio de producción)	$0.7 \times 0.8 = \mathbf{0.56}$
$K_T$ (exterior)	$0.7 \times 0.8 \times 0.9 = \mathbf{0.504}$

*Tabla 5 Coeficientes totales de las dos zonas*

#### 4.2.6. Armario eléctrico TGBT-01

El TGBT-01 es un cuadro eléctrico general que alberga una serie de cargas que quedan recogidas en la Tabla 6, junto a sus características eléctricas más importantes. Este cuadro está alimentado por el transformador TR-01, la potencia del cual es de 1600kVA, como se explica en el apartado 4.1. Este armario a la vez alimenta otros cuadros de potencia más reducida y uno dedicado únicamente a motores MCC-01.1.

EQUIPO	UNIDAD	POTENCIA (kW)	TENSIÓN			$\eta$	CORRIENTE (A)	ARMARIO	TIPO DE ARRANQUE
			(V)	FASES	Hz				
11-P-02	11	15	400	III	50	0,90	28,2	MCC-01.1	D
11-P-03	11	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	D
11-P-04	11	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	D
11-P-05	11	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	VSD
11-S-01	11	52	400	III	50	0,91	97,5	MCC-DECANTEUR	S - VSD
12-P-10A	12	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	D
12-P-10B	12	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	D
13-K-11A	13	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	D

13-K-11B	13	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	D
13-K-11C	13	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	D
13-K-11D	13	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	D
13-P-11	13	15	400	III	50	0,91	28,1	MCC-01.1	D
14-F-10	14	0,55	400	III	50	0,90	1,0	MCC-SEPARATION	S
14-L-01	14	4	400	III	50	0,90	7,5	MCC-01.1	S
14-P-10	14	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	D
14-S-11	14	132	400	III	50	0,95	236,9	MCC-SEPARATION	S - VSD
14-S-12	14	132	400	III	50	0,95	236,9	MCC-SEPARATION	S - VSD
14-S-13	14	132	400	III	50	0,95	236,9	MCC-SEPARATION	S - VSD
15-M-01	15	2,2	400	III	50	0,84	4,4	MCC-01.1	D
15-M-02	15	2,2	400	III	50	0,84	4,4	MCC-01.1	D
15-M-11	15	2,2	400	III	50	0,84	4,4	MCC-01.1	D
15-M-12	15	2,2	400	III	50	0,84	4,4	MCC-01.1	D
15-M-13	15	2,2	400	III	50	0,84	4,4	MCC-01.1	D
15-M-14	15	2,2	400	III	50	0,90	4,2	MCC-01.1	D
15-M-15	15	2,2	400	III	50	0,90	4,2	MCC-01.1	D
15-P-01	15	15	400	III	50	0,90	28,2	MCC-01.1	D
15-P-03	15	3	400	III	50	0,86	6,0	MCC-01.1	D
15-P-04	15	5,5	400	III	50	0,90	10,4	MCC-01.1	VSD
16-M-01	16	1,5	400	III	50	0,83	3,1	MCC-01.1	D
16-M-03	16	0,37	400	III	50	0,80	0,8	MCC-01.1	D
16-M-04	16	0,25	400	III	50	0,80	0,5	MCC-01.1	D
16-P-01	16	3	400	III	50	0,86	6,0	MCC-01.1	D
16-P-03	16	2,2	400	III	50	0,83	4,5	MCC-01.1	D
16-P-04	16	2,2	400	III	50	0,83	4,5	MCC-01.1	D
17-P-01	17	3	400	III	50	0,85	6,0	MCC-01.1	D
17-P-03	17	2,2	400	III	50	0,83	4,5	MCC-01.1	D
17-P-04	17	1,5	400	III	50	0,81	3,1	MCC-01.1	D
17-P-05	17	3	400	III	50	0,90	5,7	MCC-01.1	D
17-P-06	17	2,2	400	III	50	0,83	4,5	MCC-01.1	D
31-M-01	31	0,55	400	III	50	0,80	1,2	MCC-01.1	D
31-M-02	31	0,55	400	III	50	0,80	1,2	MCC-01.1	D
31-M-03	31	0,37	400	III	50	0,80	0,8	MCC-01.1	D
31-P-01	31	5,5	400	III	50	0,87	10,7	MCC-01.1	VSD
31-P-02	31	18,5	400	III	50	0,90	34,9	MCC-01.1	VSD
31-P-03	31	22	400	III	50	0,91	40,9	MCC-01.1	VSD
31-P-10	31	4	400	III	50	0,86	7,9	MCC-01.1	D
32-P-01	32	37	400	III	50	0,93	67,8	TGBT-01	VSD
41-P-01A	41	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	D
41-P-01B	41	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	D
41-P-11A	41	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	D





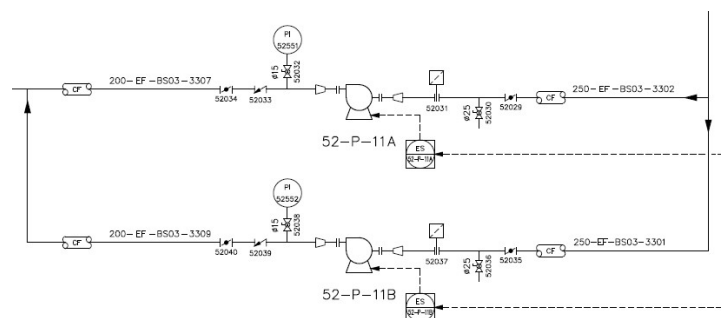
41-P-11B	41	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	D
41-P-12A	41	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	VSD
41-P-12B	41	5,5	400	III	50	0,88	10,6	MCC-01.1	VSD
52-P-01A	52	30	400	III	50	0,92	55,4	MCC-01.1	D
52-P-01B	52	30	400	III	50	0,92	55,4	MCC-01.1	D
52-P-11A	52	22	400	III	50	0,92	40,8	MCC-01.1	D
52-P-11B	52	22	400	III	50	0,92	40,8	MCC-01.1	D
56-K-01A	56	55	400	III	50	0,93	100,2	MCC-AIR1	S - D
56-K-01B	56	55	400	III	50	0,93	100,2	MCC-AIR2	S - D
56-S-01	56	5,2	400	III	50	1,00	8,8	MCC-AIR1	S - D
58-AI-05	58	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-01.1	S
TGE-01		25	400	III	50	0,90	47,2	TGBT-01	S
UPS 1,1		10	400	III	50	0,90	18,9	TGBT-01	S
UPS 1,2		10	400	III	50	0,90	18,9	TGBT-01	S
LABORTAOIRE		30	400	III	50	0,90	56,6	TGBT-01	S

*Tabla 6 Consumidores eléctricos del TGBT-01. VSD (Motor con Variador de velocidad), S-D (Consumo eléctrico considerado con arranque directo), S-VSD (Consumo eléctrico considerado con variador de velocidad), S (Unidad paquete, interruptor automático)*

En el anexo VI se adjunta el esquema unifilar de este armario. La potencia instalada total es de 1069kW.

Aún así, en la industria hay procesos que requieren de limpiezas o revisiones periódicas de los consumidores eléctricos que por el tipo de proceso a veces no pueden parar. Por ello, lo que se suele hacer, es desdoblarse aquellos consumidores que no puedan parar y a uno de ellos considerar que tiene un coeficiente de simultaneidad de 0 para hacer el cálculo del balance de potencia de la instalación. En este armario eléctrico hay 4 cargas que son de este tipo:

- 41-P-11B
- 41-P-12B
- 52-P-11B
- 56-K-01B



*Fig. 2 Ejemplo de desdoblamiento de consumidores.*

En el anexo VI se adjunta el esquema unifilar de este armario. La potencia instalada total es de 1069kW. Aún así, realmente la potencia requerida por los consumidores teniendo en cuenta el factor de simultaneidad es de CNL=553kW y CL=422kW.

Teniendo en cuenta que los consumidores tienen un factor de utilización de 0.85, cada uno su respectivo rendimiento, un factor de simultaneidad de 1, excepto aquellos que son comentados con anterioridad y un  $\cos\phi=0.95$ , la potencia activa que requerirán del transformador es de 887kW i por lo tanto el transformador está cargado al 65%.

#### 4.2.7. Armario eléctrico TGBT-02

El TGBT-01 es un cuadro eléctrico general que alberga una serie de cargas que quedan recogidas en la Tabla 7, junto a sus características eléctricas más importantes. Este cuadro está alimentado por el transformador TR-02, la potencia del cual es de 1600kVA, como se explica en el apartado 4.1. Este armario a la vez alimenta otros cuadros de potencia más reducida y uno dedicado únicamente a motores MCC-02.1.

EQUIPO	UNIDAD	POTENCIA (kW)	TENSIÓN			$\eta$	CORRIENTE (A)	ARMARIO	TIPO DE ARRANQUE
			(V)	FASES	(Hz)				
18-P-01	18	5,5	400	III	50	0,90	10,4	MCC-FILT#3	VSD
18-P-10	18	2,2	400	III	50	0,90	4,2	MCC-02,1	D
20-L-01	20	4	400	III	50	0,90	7,5	MCC-02,1	D
20-L-02	20	4	400	III	50	0,90	7,5	MCC-02,1	D
20-M-01	20	1,5	400	III	50	0,83	3,1	MCC-02,1	D
20-M-02	20	0,55	400	III	50	0,80	1,2	MCC-02,1	D
20-M-03	20	0,25	400	III	50	0,80	0,5	MCC-02,1	D
20-M-11	20	40	400	III	50	0,90	75,5	MCC-02,1	VSD
20-P-01	20	1,1	400	III	50	0,90	2,1	MCC-02,1	D
20-P-02	20	0,75	400	III	50	0,90	1,4	MCC-02,1	VSD
20-P-03	20	0,75	400	III	50	0,90	1,4	MCC-02,1	D
20-P-04	20	1,1	400	III	50	0,90	2,1	MCC-FILT#3	VSD
20-P-05	20	1,1	400	III	50	0,90	2,1	MCC-FILT#3	VSD
20-P-10	20	5,5	400	III	50	0,90	10,4	MCC-02,1	D
20-P-11	20	30	400	III	50	0,90	56,6	MCC-FILT#3	D
20-P-20	20	2,2	400	III	50	0,90	4,2	MCC-02,1	D
20-P-30	20	3	400	III	50	0,90	5,7	MCC-02,1	D
20-S-01	20	5,5	400	III	50	0,90	10,4	MCC-FILT#3	VSD
20-X-01	20	40	400	III	50	0,90	75,5	MCC-FILT#3	VSD
22-E-11	22	4	400	III	50	0,90	7,5	MCC-02,1	S
22-E-12	22	4	400	III	50	0,90	7,5	MCC-02,1	S
22-K-01	22	90	400	III	50	0,94	162,2	TGBT-02	VSD
22-K-02	22	90	400	III	50	0,94	162,2	TGBT-02	VSD
22-K-11	22	75	400	III	50	0,94	135,5	TGBT-02	VSD
22-K-12	22	75	400	III	50	0,94	135,5	TGBT-02	VSD
22-L-01	22	0,37	400	III	50	0,90	0,7	MCC-02,1	VSD
22-L-02	22	0,37	400	III	50	0,90	0,7	MCC-02,1	VSD
22-L-11A	22	0,25	400	III	50	0,90	0,5	MCC-02,1	D
22-L-11B	22	0,25	400	III	50	0,90	0,5	MCC-02,1	D





22-L-12A	22	0,25	400	III	50	0,90	0,5	MCC-02,1	D
22-L-12B	22	0,25	400	III	50	0,90	0,5	MCC-02,1	D
22-P-01	22	11	400	III	50	0,90	20,8	MCC-02,1	D
24-K-01	24	15	400	III	50	0,90	28,3	MCC-02,1	VSD
24-K-10	24	15	400	III	50	0,90	28,3	MCC-02,1	VSD
24-L-01	24	0,37	400	III	50	0,90	0,7	MCC-02,1	D
24-L-02	24	0,37	400	III	50	0,90	0,7	MCC-02,1	D
24-L-10	24	0,37	400	III	50	0,90	0,7	MCC-02,1	VSD
24-L-11	24	0,37	400	III	50	0,90	0,7	MCC-02,1	D
24-S-03	24	2,2	400	III	50	0,90	4,2	MCC-02,1	D
24-V-01	24	30	400	III	50	0,90	56,6	MCC-02,1	S - VSD
32-P-02A	32	7,5	400	III	50	0,90	14,2	MCC-02,1	D
32-P-02B	32	7,5	400	III	50	0,90	14,2	MCC-02,1	D
54-P-01A	54	37	400	III	50	0,90	69,8	TGBT-02	SS
54-P-01B	54	37	400	III	50	0,90	69,8	TGBT-02	SS
54-P-11A	54	30	400	III	50	0,90	56,6	TGBT-02	D
54-P-11B	54	30	400	III	50	0,90	56,6	TGBT-02	D
54-V-01A	54	225	400	III	50	0,90	424,5	TGBT-02	S
54-V-01B	54	225	400	III	50	0,90	424,5	TGBT-02	S
59-AI-01	59	3	400	III	50	0,90	5,7	MCC-CLIMA	S
59-AI-02B	59	3	400	III	50	0,90	5,7	MCC-CLIMA	S
59-AI-02C	59	18,5	400	III	50	0,90	34,9	MCC-CLIMA	S
59-AI-03	59	7,5	400	III	50	0,90	14,2	MCC-CLIMA	S
59-P-01	59	4	400	III	50	0,90	7,5	MCC-02,1	D
59-P-02	59	3	400	III	50	0,90	5,7	MCC-02,1	D
UPS 1,3		10	400	III	50	0,90	18,9	TGBT-02	S
UPS 1,4		10	400	III	50	0,90	18,9	TGBT-02	S

*Tabla 7 Consumidores eléctricos del TGBT-02. VSD (Motor con Variador de velocidad), S-D (Consumo eléctrico considerado con arranque directo), S-VSD (Consumo eléctrico considerado con variador de velocidad), S (Unidad paquete, interruptor automático)*

En este armario eléctrico igual que el TGBT-01 hay tres consumidores que tienen un factor de simultaneidad de 0:

- 32-P-02A
- 54-P-01B
- 54-P-11B

En el anexo VI se adjunta el esquema unifilar de este armario. La potencia instalada total es de 1221kW. Aún así, realmente la potencia requerida por los consumidores teniendo en cuenta el factor de simultaneidad es para CNL=485kW y CL=662kW.

Teniendo en cuenta que los consumidores tienen un factor de utilización de 0.85, cada uno su respectivo rendimiento, un factor de simultaneidad de 1 y un  $\cos\varphi=0.95$ , la potencia

activa que requerirán del transformador es de 1036kW i por lo tanto el transformador está cargado al 76%.

#### 4.2.8. Armario eléctrico TGBT-03

El TGBT-03 es un cuadro eléctrico general que alberga una serie de cargas que quedan recogidas en la Tabla 8 junto a sus características eléctricas más importantes. Este cuadro está alimentado por el transformador TR-03, la potencia del cual es de 2000kVA, como se explica en el apartado 4.1.

EQUIPO	UNIDAD	POTENCIA (kW)	TENSIÓN			$\eta$	CORRIENTE (A)	ARMARIO	TIPO DE ARRANQUE
			(V)	FASES	(Hz)				
13-K-01A	13	355	400	III	50	0,95	633,9	TGBT-03	VSD
13-K-01B	13	315	400	III	50	0,95	562,5	TGBT-03	SS
13-K-02A	13	355	400	III	50	0,95	633,9	TGBT-03	VSD
13-K-02B	13	315	400	III	50	0,95	562,5	TGBT-03	SS
13-P-01	13	45	400	III	50	0,93	82,4	TGBT-03	SS
13-P-02	13	45	400	III	50	0,93	82,4	TGBT-03	SS
52-V-01A	52	175	400	III	50	1,00	297,2	TGBT-03	S - VSD

*Tabla 8 Consumidores eléctricos del TGBT-03. VSD (Motor con Variador de velocidad), SS (Motor con Arrancador progresivo), S-VSD (Consumo eléctrico considerado con variador de velocidad)*

En el anexo VI se adjunta el esquema unifilar de este armario. La potencia instalada total es de 1605kW (CNL=885kW y CL=720kW).

Teniendo en cuenta que los consumidores tienen un factor de utilización de 0.85, cada uno su respectivo rendimiento, un factor de simultaneidad de 1 y un  $\cos\phi=0.95$ , la potencia activa que requerirán del transformador es de 1429kW i por lo tanto el transformador está cargado al 84%.

#### 4.2.9. Armario eléctrico TGBT-04

El TGBT-04 es un cuadro eléctrico general que alberga una serie de cargas que quedan recogidas en la Tabla 9 junto a sus características eléctricas más importantes. Este cuadro está alimentado por el transformador TR-04, la potencia del cual es de 2000kVA, como se explica en el apartado 4.1.



EQUIPO	UNIDAD	POTENCIA (kW)	TENSIÓN			$\eta$	CORRIENTE (A)	ARMARIO	TIPO DE ARRANQUE
			(V)	FASES	(Hz)				
13-K-03A	13	355	400	III	50	0,95	633,9	TGBT-04	VSD
13-K-03B	13	315	400	III	50	0,95	562,5	TGBT-04	SS
13-K-04A	13	355	400	III	50	0,95	633,9	TGBT-04	VSD
13-K-04B	13	315	400	III	50	0,95	562,5	TGBT-04	SS
13-P-03	13	45	400	III	50	0,93	82,4	TGBT-04	SS
13-P-04	13	45	400	III	50	0,93	82,4	TGBT-04	SS
52-V-01B	52	175	400	III	50	1,00	297,2	TGBT-04	S - VSD

*Tabla 9 Consumidores eléctricos del TGBT-04. VSD (Motor con Variador de velocidad), SS (Motor con Arrancador progresivo), S-VSD (Consumo eléctrico considerado con variador de velocidad)*

En el anexo VI se adjunta el esquema unifilar de este armario. La potencia instalada total es de 1605kW (CNL=885kW y CL=720kW).

Teniendo en cuenta que los consumidores tienen un factor de utilización de 0.85, cada uno su respectivo rendimiento, un factor de simultaneidad de 1 y un  $\cos\phi=0.95$ , la potencia activa que requerirán del transformador es de 1429kW i por lo tanto el transformador está cargado al 84%.

#### 4.2.10. Armario eléctrico TGBT-05

Este armario eléctrico como se detalla en apartados anteriores alimenta aquellas cargas que se encuentran fuera del edificio de producción. Además, este no contiene cargas no lineales, cosa que lo hace poco atractivo para el posterior estudio de armónicos. Por lo tanto, se va a detallar su composición simplemente para su dimensionado eléctrico de cables y la confección de su esquema unifilar adjuntado en el anexo VI. Sus cargas eléctricas son:

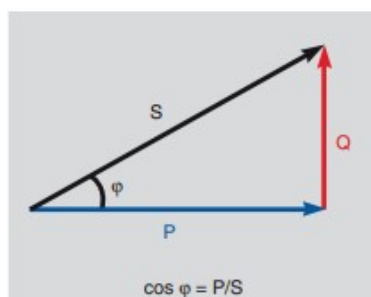
EQUIPO	UNIDAD	POTENCIA (kW)	TENSIÓN			$\eta$	CORRIENTE (A)	ARMARIO	TIPO DE ARRANQUE
			(V)	FASES	(Hz)				
42-P-01	42	5,5	400	III	50	0,87	10,7	TGBT-05	D
42-P-02	42	3	400	III	50	0,85	6,0	TGBT-05	D
42-P-11	42	3	400	III	50	0,86	6,0	TGBT-05	D
42-P-12	42	2,2	400	III	50	0,84	4,4	TGBT-05	D
50-P-01A	50	30	400	III	50	0,92	55,4	TGBT-05	D

50-P-01B	50	30	400	III	50	0,92	55,4	TGBT-05	D
51-P-01	51	30	400	III	50	0,92	55,4	TGBT-05	D
51-P-02	51	30	400	III	50	0,92	55,4	TGBT-05	D
51-P-03	51	0,02	230	F+N	50	0,90	0,1	TGBT-05	S
51-P-04	51	0,02	230	F+N	50	0,90	0,1	TGBT-05	S
53-P-01A	53	15	400	III	50	0,90	28,2	TGBT-05	D
53-P-01B	53	15	400	III	50	0,90	28,2	TGBT-05	D
53-U-01	53	55	400	III	50	0,90	103,8	TGBT-05	S
55-E-01A	55	75	400	III	50	0,94	135,5	TGBT-05	SS
55-E-01B	55	75	400	III	50	0,94	135,5	TGBT-05	SS
55-E-01C	55	75	400	III	50	0,94	135,5	TGBT-05	SS
55-E-01D	55	75	400	III	50	0,94	135,5	TGBT-05	SS
55-P-01A	55	132	400	III	50	0,95	236,7	TGBT-05	SS
55-P-01B	55	132	400	III	50	0,95	236,7	TGBT-05	SS
55-P-01C	55	132	400	III	50	0,95	236,7	TGBT-05	SS
55-P-01D	55	132	400	III	50	0,95	236,7	TGBT-05	SS
55-P-01E	55	132	400	III	50	0,95	236,7	TGBT-05	SS
55-P-02	55	0,02	230	F+N	50	0,90	0,1	TGBT-05	S
55-P-03	55	0,02	230	F+N	50	0,90	0,1	TGBT-05	S
55-P-04	55	0,02	230	F+N	50	0,90	0,1	TGBT-05	S
60-S-01	60	0,02	230	F+N	50	0,90	0,1	TGBT-05	S
61-U-01	61	700	400	III	50	0,90	1320,7	TGBT-05	S
TGE-02		20	400	III	50	0,90	37,7	TGBT-05	S
Bureaux		60	400	III	50	0,90	113,2	TGBT-05	S
Atelier		25	400	III	50	0,90	47,2	TGBT-05	S

*Tabla 10 Consumidores eléctricos del TGBT-05. D (Motor con Arranque directo), SS (Motor con Arrancador progresivo), S (Unidad paquete, interruptor automático)*

#### 4.2.11. Compensación de Potencia Reactiva

La instalación a estudiar contiene un alto número de motores eléctricos de diferentes potencias. Estos, igual que otros receptores necesitan de campos magnéticos para su funcionamiento y consumen no solo energía activa si no que también potencia reactiva. La relación entre ellas y la potencia aparente es el  $\cos\varphi$ .



*Fig. 3 El  $\cos\varphi$  como representación del rendimiento de una instalación.*



Estas cargas, llamadas también cargas inductivas absorben energía de la red durante la creación de los campos magnéticos y la entregan durante la destrucción de los mismos. Este trasiego de energía entre los consumidores y la fuente provoca pérdidas, caídas de tensión en los mismos, y un consumo de energía suplementario que no es aprovechable por los receptores.

Por lo tanto, se puede afirmar que la potencia útil que se puede disponer de una instalación aumenta conforme se mejora el  $\cos\phi$  de la instalación.

Las compañías eléctricas penalizan económicamente el consumo de energía reactiva con el objetivo de incentivar su corrección. En el mercado liberalizado se establecen unas tarifas de acceso, y en este caso la instalación tendría una tarifa de acceso 6.1 y requiere de compensación de potencia reactiva [4].

Los precios del término de energía reactiva son:

Para  $\cos\phi < 0,95$  y hasta  $\cos\phi = 0,90$ : 0,000010 €/kVarh.  
 Para  $\cos\phi < 0,90$  y hasta  $\cos\phi = 0,85$ : 0,013091 €/kVarh.  
 Para  $\cos\phi < 0,85$  y hasta  $\cos\phi = 0,80$ : 0,026182 €/kVarh.  
 Para  $\cos\phi < 0,80$ : 0,039274 €/kVarh.

*Fig. 4 Precios de la energía reactiva.[5]*

Como no se dispone de suficiente información de los consumidores se considerará un  $\cos\phi=0.85$  para todos. El criterio será montar una batería de condensadores aguas abajo de cada transformador que pueda compensar el  $\cos\phi$  hasta 0,95, y la potencia activa que se tomará como referencia para el cálculo será la potencia nominal total de los consumidores. En caso de que haya futuras ampliaciones, como las cargas solo trabajan al 85% de su potencia nominal, seguramente no haya problemas, aún así habría que revisar la configuración. Las baterías de condensadores de para cada unifilar serán:

- TGBT-03 / TGBT-04:

Los consumidores alimentados por TGBT-03 y TGBT-04 son homólogos, por lo tanto les tocará la misma batería de condensadores.

$$Pot_{TOTAL} = 1605kW$$

$$\cos\phi_2 = 0.95 \rightarrow 18.1949^\circ$$

$$\tan(\phi_2) = 0.3287$$

$$\cos\phi_1 = 0.85 \rightarrow 31.7883^\circ$$

$$\tan(\phi_1) = 0.619744$$

$$Q_c = P * (tag\varphi_1 - tag\varphi_2) = 1605 * (0.6197 - 0.3287) = 468kVAr \quad (4.1)$$

- TGBT-01

En este armario hay 4 consumidores con un coeficiente de simultaneidad de 0 (ver apartado 4.2.6). Por ello la potencia reactiva que habría que compensar, sería sin tener en cuenta estos consumidores:

$$Pot_{TOTAL} = 975kW$$

$$Q_c = P * (tag\varphi_1 - tag\varphi_2) = 975 * (0.6197 - 0.3287) = 284kVAr \quad (4.2)$$

TGBT-02

$$Pot_{TOTAL} = 1036kW$$

$$Q_c = P * (tag\varphi_1 - tag\varphi_2) = 1036 * (0.6197 - 0.3287) = 300kVAr \quad (4.3)$$

- TGBT-05

$$Pot_{TOTAL} = 1984kW$$

$$Q_c = P * (tag\varphi_1 - tag\varphi_2) = 1984 * (0.6197 - 0.3287) = 578kVAr \quad (4.4)$$

Las baterías de condensadores para cada cuadro quedan recogidas en la Tabla 11:

Cuadro	Q <sub>c</sub>
TGBT-01	284kVAr
TGBT-02	300kVAr
TGBT-03	468kVAr
TGBT-04	468kVAr
TGBT-05	578kVAr

*Tabla 11 Baterías de condensadores para cada cuadro.*



## 5. Dimensionado eléctrico

El dimensionado eléctrico como se comenta en el apartado 2.1 se reduce solamente al dimensionado de cables eléctricos, sabiendo que un dimensionado completo incluiría protecciones eléctrico, maniobras, puesta a tierra...etc. Para ello cabe tener en cuenta las características de la instalación y coeficientes comentados en apartados anteriores.

Para el correcto dimensionado de los conductores, se usarán dos criterios: densidad de corriente y caída de tensión.

### 5.1. Densidad de corriente

La idea de este apartado es encontrar un cable que una vez aplicados los coeficientes de reducción de la ampacidad del mismo, pueda soportar la intensidad requerida por el consumidor que alimenta. Para ello, lo que se procede a hacer es coger la intensidad de consumo y aplicarle los coeficientes explicados en los apartados 4.2.2 y 4.2.5.

$$I_{\text{mínima ampacidad del cable}} = \frac{I_{\text{consumo}} * K_{\text{coeficiente de mayoracion}}}{K_T} \quad (5.1)$$

Cuando a la intensidad de consumo se le aplican los coeficientes se obtiene la ampacidad mínima que debe tener el cable. Por lo tanto, yendo a la Tabla 1, y la columna 10B, ya que el conductor es XLPE3 y la instalación es en bandeja, solo hay que comparar y encontrar aquel conductor que justo pueda soportar la intensidad resultado de la ecuación 5.1 y de esta manera cumpla con la siguiente condición:

$$I_{\text{cable}} \geq I_{\text{mínima ampacidad del cable}} \quad (5.2)$$

Cogiendo el caso del consumidor 11-P-02 que es un motor y se encuentra en el edificio de producción y tiene un consumo de 28.2A:

$$I_{\text{mínima ampacidad del cable}} = \frac{28.2 * 1.25}{0.56} = 62.95A \quad (5.3)$$

$$\text{Sección } 6\text{mm}^2 \rightarrow 49A$$

$$Sección 10mm^2 \rightarrow 68A$$

$$Sección 10mm^2 \rightarrow 68A \geq 62.95 A \quad (5.4)$$

## 5.2. Caída de tensión

Tener controlada y minimizar la caída de tensión es crucial para garantizar un buen funcionamiento de la instalación y reducir pérdidas por calentamiento.

Este apartado está centrado en el cálculo de la caída de tensión permanente y en el arranque. En el caso de la caída de tensión al arranque, esta estará limitada al 15% entre cuadro y consumidor final y un  $\cos\varphi=0.3$ . Además, solo aplicará a aquellos motores de arranque directo y las unidades paquete, aquellos motores alimentados mediante electrónica de potencia no estarán sujetos a tal restricción.

La caída de tensión permanente queda limitada al 5% desde el origen de la línea hasta el consumidor final, limitando como criterio general un máximo del 2% entre transformador y cuadro, y un máximo 3% de cuadro a consumidor final.

Las intensidades de empleo para cada caso y cálculo queda explicado en el apartado 4.2.2.

La expresión para determinar la caída de tensión para aquellos consumidores monofásicos se muestra en la ecuación 5.5:

$$s = \frac{2 * L * I * \cos\varphi}{\theta * \Delta U} \quad (5.5)$$

La expresión para determinar la caída de tensión para aquellos consumidores trifásicos se muestra en la ecuación 5.6:

$$s = \frac{\sqrt{3} * L * I * \cos\varphi}{\theta * \Delta U} \quad (5.6)$$

Dónde:

$L$  = Longitud en metros [m]

$I$  = Intensidad de consumo [A]

$\cos\varphi$  = factor de potencia





$\Delta U = \text{caída de tensión máxima admisible en voltios [V]}$

$Y = \text{conductividad } \left[ \frac{m}{\Omega * mm^2} \right]$

Para calcular la conductividad:

$$Y_{\theta} = 1/\rho_{\theta} \quad (5.7)$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20}[1 + \alpha(\theta - 20)] \quad (5.8)$$

Dónde:

$\rho_{\theta} = \text{resistividad del conductor a la temperatura } \theta \text{ en } \frac{\Omega * mm^2}{m}$

$\rho_{20} = \text{resistividad del conductor a } 20^{\circ}\text{C en } \frac{\Omega * mm^2}{m} = \frac{1}{58} \text{ para cobre}$

$\alpha = \text{coeficiente de variación de la resistencia específica por temperatura del conductor en } ^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ (0.00393 para Cu y 0.00407 para Al)}$

### 5.3. Resultados

Los resultados del dimensionado eléctrico debido a su extensa extensión quedan recogidos en el anexo XII. En la Tabla 12, se muestran dos ejemplos de dos consumidores eléctricos cualquiera, con todos los resultados anteriormente detallados y las secciones de los conductores eléctricos adecuadas para los mismos:

TAG	ARMARIO	POTENCIA (kW)	TENSIÓN (V)	Intensidad nominal (A)	Intensidad corregida (A)	Intensidad arranque (A)	Sección densidad de corriente (mm2)
12-P-10A	MCC-01.1	11	400	20,8	26,0	156,0	6
13-K-01A	TGBT-03	355	400	633,9	792,4	-	240

TAG	Sección caída tensión (mm <sup>2</sup> )	Sección caída tensión arranque (mm <sup>2</sup> )	Sección final (mm <sup>2</sup> )	COMPOSICIÓN (mm <sup>2</sup> )						Cables por fase	LONGITUD (m)	C.D.T. (%)	C.D.T. arranque (%)
12-P-10A	4	2,5	6	3F+T	3	x	6	+	T	1	60	1,84%	4,87%
13-K-01A	10	-	240	3F+T	3x1	x	240	+	T	3	10	0,08%	-

*Tabla 12 Ejemplo de dos consumidores eléctricos con su respectivo dimensionado eléctrico.*



## 6. Armónicos

El objeto de este capítulo es explicar los conceptos teóricos necesarios para el cálculo posterior de armónicos. La explicación del fenómeno físico que hay detrás de los problemas causados por los armónicos es esencial para comprender el problema y saber implementar las mejoras que lo solucionen.

### 6.1. Origen; Cargas no lineales

El origen de los armónicos en las instalaciones son las cargas no lineales, las cuales deforman la forma de onda de la tensión y la corriente. Este efecto es producido, entre otros factores, por la presencia de semiconductores como serían diodos, transistores, IGBT's...etc. En la industria, estos elementos son presentes muy habitualmente en forma de dispositivos electrónicos de control como variadores de frecuencia o arrancadores progresivos o cargas que utilizan arco eléctrico.

A continuación se muestran una serie de cargas no lineales con sus ondas y espectros correspondientes:

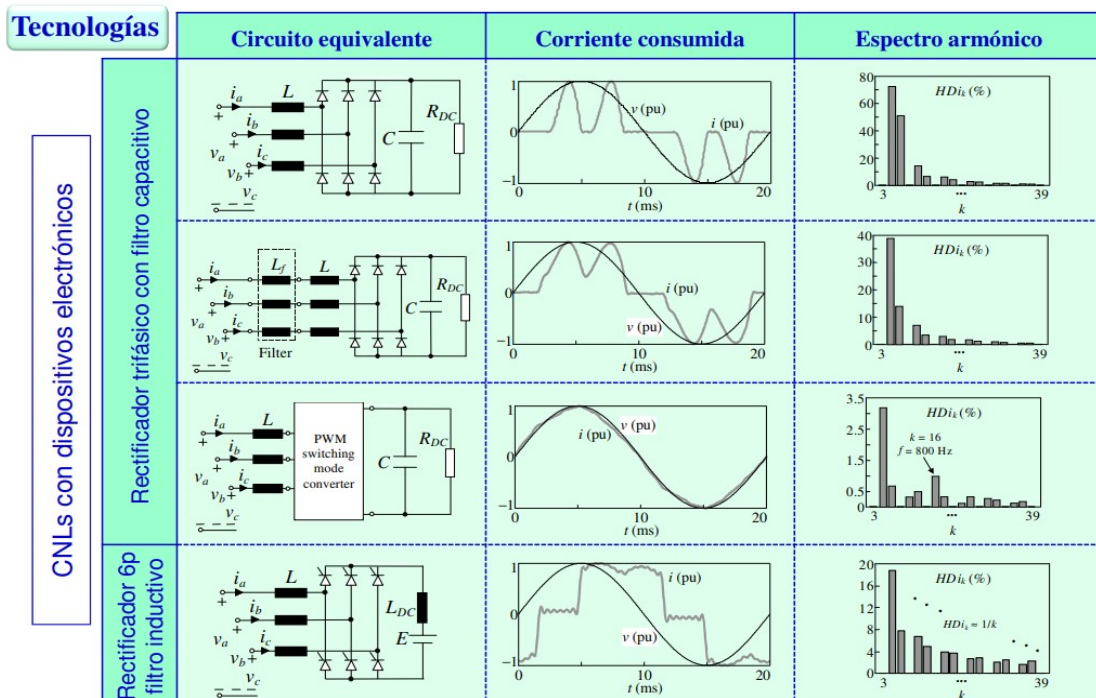


Fig. 5 Efectos de diferentes circuitos electrónicos en la forma de onda y espectro armónico.[6]

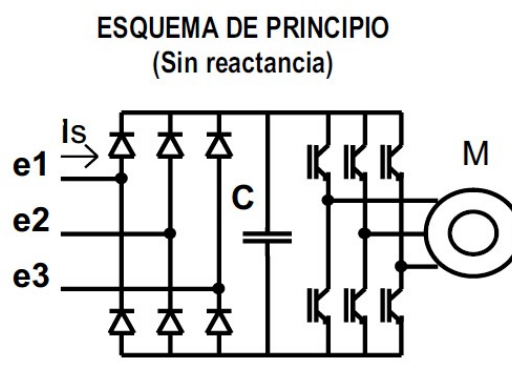
La instalación a estudiar, como suele ser común, contiene variadores de frecuencia y arrancadores progresivos especialmente para aquellos consumidores de potencia elevada.

### 6.1.1. Variadores de velocidad

Los variadores de frecuencia o velocidad son dispositivos electrónicos que permiten el control completo de motores eléctricos de inducción. En el caso de este proyecto se decide montar los variadores de serie ATV 71 (la información para los cálculos será extraída, de este modelo). Este tipo de dispositivos se usan sobre todo en motores de potencias elevadas debido a que algunas de sus ventajas son:

- Evita picos o puntas de corriente en el momento del arranque.
- El par se controla totalmente a cualquier velocidad, lo que evita saltos o bloqueos del motor ante la carga.
- Comunicación mediante bus industrial que permite conocer en tiempo real el estado del variador y el motor, así como el historial de fallos.
- Los arranques y paradas son controlados y suaves, sin golpes que podrían dañar elementos mecánicos como cojinetes.
- El consumo energético se adapta a la exigencia del motor.

El esquema reducido de un variador como los que se instalarían sería un rectificador trifásico capacitivo, un ondulador y un filtro pasivo.



*Fig. 6 Esquema del principio de un variador de velocidad [5].*

### 6.1.2. Arrancadores progresivos

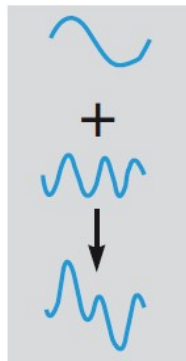
Los arrancadores progresivos solo se intervienen en el momento del arranque del motor.



Por lo tanto, solo serían objeto de estudio si el cálculo de armónicos fuera en régimen transitorio. Ya que todos los modelos usados para los cálculos son en régimen permanente, no tiene sentido incluirlos en el cálculo como cargas no lineales y serán incluidos como cargas lineales.

## 6.2. Caracterización de los armónicos

En electricidad los armónicos son las ondas de tensión intensidad cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la red. El caso más habitual y el que es objeto de cálculo son 50Hz. Generalmente se presentan varias ondas de diferentes órdenes a la vez formando como resultado una onda distorsionada. Un ejemplo sería la Fig. 7:



*Fig. 7 Ejemplo de descomposición de onda distorsionada.[5]*

Las series de Fourier permiten describir cualquier función periódica a partir de la combinación de funciones sinusoidales simples, que al final es el principio básico del estudio armónico.

### 6.2.1. Tasa de Distorsión armónica (THD)

La tasa de distorsión armónica representa en % la importancia del total de la distorsión respecto al valor de la fundamental o respecto al valor total de la onda.

$$THD \% = 100 * \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}}{H_1} \quad (6.1)$$

Para conocer la situación real de las instalaciones sobre el grado de contaminación armónica, los valores de trabajo son:

- **La tasa de distorsión armónica global de tensión [THD(u)]** determina la deformación de la onda de tensión , e indica la relación existente entre la suma de

las tensiones de los armónicos y la tensión de la fundamental, expresándose en %.

- **La tasa de distorsión armónica global en corriente [THD(i)]** determina la deformación de la onda de corriente, e indica la relación existente la suma de las corrientes de los armónicos y la corriente de la fundamental, expresándose en %.

La tasa de distorsión armónica es una variable que permite calificar la calidad eléctrica de una instalación y se tiene que ajustar a los valores estipulados por la normativa vigente. En el anexo VII se detalla cuales son aquellas variables que permiten calificar la calidad eléctrica de la instalación.

### 6.2.2. Tasa de distorsión armónica individual

Es la relación entre el valor eficaz de un armónico y el valor eficaz de la componente fundamental:

$$HD_h = 100 * \frac{H_h}{H_1} \quad (6.2)$$

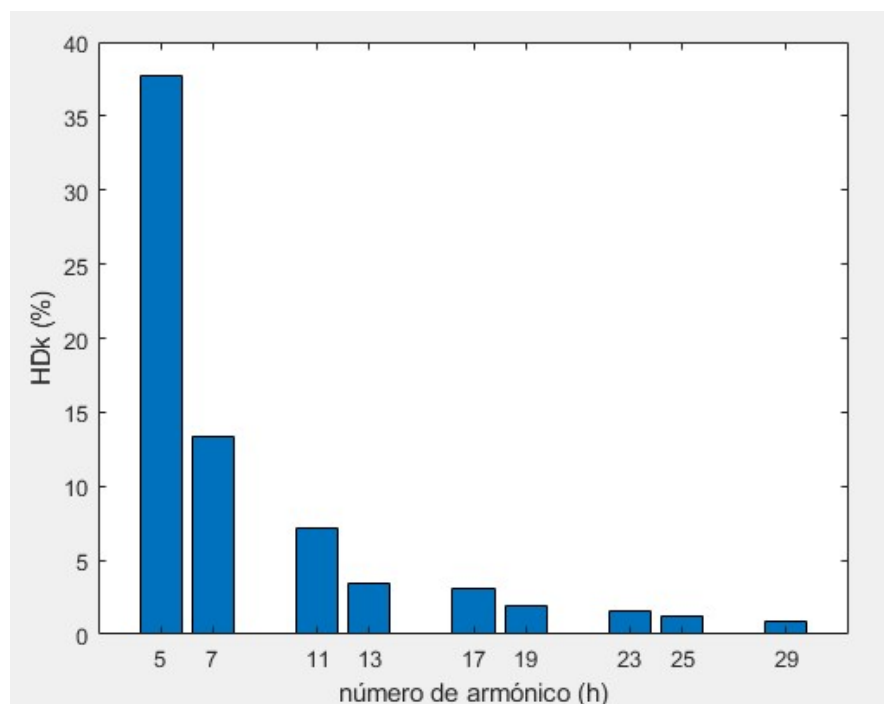
El modelo de variador escogido (ATV -71) presenta unos valores diferentes de distorsión armónica en su espectro armónico dependiendo de su potencia como se ve en el anexo VIII. Para simplificar el ejercicio, se tomará como referencia que las distorsiones armónicas de todos los variadores será la misma independientemente de su potencia, tomando los valores del modelo de 355kW como referencia. El estudio llegará tan solo hasta el armónico 29, ya que más allá adopta valores pequeños que no son recurrentes.

Ya que la instalación es trifásica y se supone que las tres fases están equilibradas, los armónicos múltiplos de 3 se anulan. Los valores de la distorsión armónica para cada armónico se adjuntan en el anexo VIII y quedan recogidos en la Tabla 13. En la Fig. 8 queda representado el espectro armónico en un diagrama de barras.

HD <sub>5</sub>	HD <sub>7</sub>	HD <sub>11</sub>	HD <sub>13</sub>	HD <sub>17</sub>	HD <sub>19</sub>	HD <sub>23</sub>	HD <sub>25</sub>	HD <sub>29</sub>
37.7%	13.4%	7.13%	3.41%	3.05%	1.93%	1.54%	1.27%	0.85%

*Tabla 13 Valores de distorsión armónica de referencia.*





*Fig. 8 Espectro armónico del ATV 71.*

### 6.3. Efectos de los armónicos sobre las cargas

La presencia de armónicos en una instalación puede producir efectos negativos en la misma. Y estos efectos son tanto a corto como a largo plazo.

A continuación en la Tabla 14 se adjunta un resumen que adjunta sus causas y sus consecuencias según cada equipo:

Efectos	Causa	Consecuencia
Conductores activos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las intensidades armónicas provocan el aumento de las IRMS.</li> <li>-El efecto pelicular (efecto "skin") reduce la sección efectiva de los conductores medida que aumenta la frecuencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disparos intempestivos de las protecciones</li> <li>-Sobrecalentamiento de los conductores.</li> </ul>

Conductor del neutro	-Cuando existe una carga trifásica + neutro equilibrada que genera armónicos impares múltiplos de 3.	-Cierre de los armónicos homopolares sobre el neutro que provoca calentamientos y sobre intensidades.
Transformadores	-Aumento de las IRMS.  -Las pérdidas de Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia.	-Aumento de los calentamientos por efecto Joule en los devanados.  -Aumento de las pérdidas en el hierro.
Motores	-Análogas a los transformadores.	-Análogas a los transformadores  -Presencia de pares pulsantes
Condensadores	-Disminución de la impedancia del condensador con el aumento de la frecuencia.	-Envejecimiento prematuro , amplificación de los armónicos existentes

*Tabla 14 Efectos, causas y consecuencias de los armónicos.[5]*

## 6.4. Mitigación de los armónicos

Las soluciones de mitigación de armónicos son varias dependiendo de cuál es el problema que se quiere solventar. Ante todo, primero hay que tener muy claro cuáles son los elementos que se tienen en la instalación, es decir, diferenciar muy bien las cargas lineales de las no lineales, y por otro lado si la red a estudiar hay ausencia o presencia de condensadores. En el caso de que no hubiera condensadores, la polución por armónicos es proporcional a las corrientes de las fuentes perturbadoras. En el caso contrario, las magnitudes armónicas (corrientes y tensiones) pueden ser peligrosamente amplificadas por el efecto de resonancia.

También cabe decir que las propuestas deben ser las suficientes para resolver el problema planteado, pero nunca ser sobredimensionadas ya que eso dispararía el coste.

A continuación se presentan dos sistemas de reducción de armónicos. Por un lado se tienen los filtros activos que actúan sobre el origen del problema (la carga no lineal) y por el otro lado los filtros pasivos que actúan sobre sus consecuencias (las tensiones armónicas).

Hay otros métodos para atenuar los armónicos que consisten en modificar la instalación, pero que no resultan interesantes en este caso, ya que la instalación no dispone de



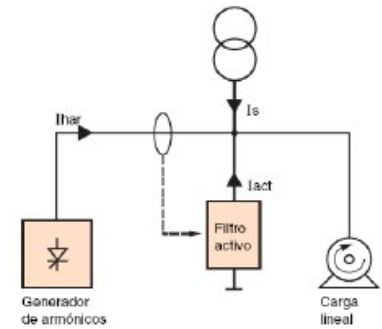


demasiado espacio como para llevarlos a cabo y eléctricamente son modificaciones difíciles de realizar.

#### 6.4.1. Filtros Activos

Los filtros activos están basados en la tecnología de electrónica de potencia.

Normalmente se instalan en paralelo a las cargas no lineales. Estos la acción que realizan es analizar los armónicos generados por las cargas no lineales y compensarlos inyectando a la red la misma corriente armónica desfasada  $180^\circ$ . Como resultado las corrientes se neutralizan y ya no circulan aguas arriba del filtro activo. El principal inconveniente de estos dispositivos es el elevado precio que tienen.



Sus características principales son:

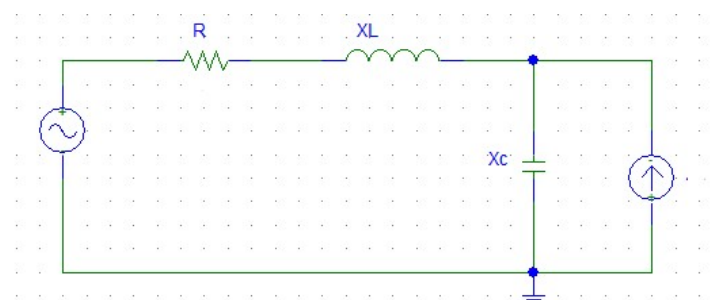
*Fig. 9 Esquema instalación filtro activo. [5]*

- Autoconfiguración para cargas de armónicos independientemente del orden de magnitud.
- Eliminación de riesgos de sobrecarga.
- Compatibilidad con generadores eléctricos.
- Conexión en cualquier punto de la red eléctrica.
- Se pueden usar varios compensadores activos en la misma instalación.

#### 6.4.2. Filtro Pasivo

La presencia de condensadores no genera armónicos, pero si puede amplificar armónicos existentes.

Suponiendo una instalación tal como se muestra en la Fig. 10 que  $Z_h$  es la impedancia de Thevenin de la instalación para cada armónico vista desde la carga no lineal,  $R$  la parte resistiva,  $X_L$  la parte inductiva,  $X_C$  los condensadores y la fuente de corriente la representación de las cargas no lineales:



*Fig. 10 Esquema de la instalación ejemplo.*

La expresión de la impedancia de la instalación sería:

$$Z_h = \frac{1}{Y_h} = \frac{1}{\frac{1}{R + jX_L * h} + \frac{1}{-j\frac{X_c}{h}}} \quad (6.3)$$

Dando valores de  $h$  en la ecuación 6.3 y sacando valores se observa que a una cierta frecuencia o número de armónico  $h$ , llamada frecuencia de resonancia hay un pico. Este fenómeno si coincide con algún armónico inyectado por las cargas no lineales puede provocar un aumento de la tensión armónica inaceptable para la instalación ( $THDu > 5\%$ ).

Esto causa que los condensadores absorban intensidades armónicas más elevadas y por lo tanto se reduce la vida de los mismos. Para evitarlo debe cambiar la frecuencia de resonancia por un valor que no presente resonancia con ninguno de los armónicos que estén presentes.

Para conseguir tal efecto, se añade una inductancia anti armónicos en serie con los condensadores. Al este conjunto LC se le denomina filtro pasivo.

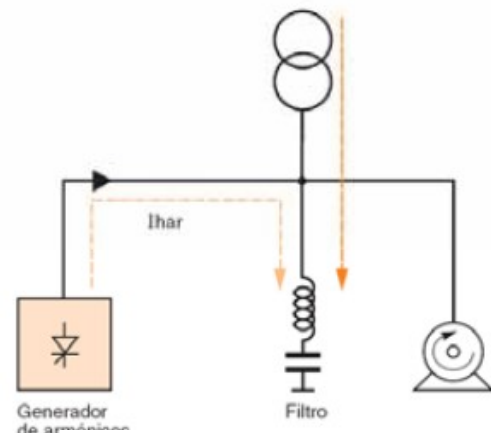


Fig. 11 Esquema filtro pasivo. [5]

### 6.4.3. Desplazamiento de la frecuencia de resonancia

El método más eficaz para desplazar el punto de resonancia es conectando una reactancia inductiva en serie calculando su valor para una frecuencia sintonizada donde no haya tanta presencia de armónicos. Lo ideal es situarlo a una frecuencia lo más alejada de la inyección armónica de corrientes. El gran inconveniente es que el coste de un filtro óptimo que sintonice a la frecuencia que se desee es muy elevado. Aún así, existen filtros que sintonizan a una frecuencia de 190-250 Hz ( $h=4.3$ ), que dan un resultado bastante positivo y el precio es asumible.

Con la presencia de la inductancia en serie se obtienen dos efectos muy positivos para la instalación:

- Se desplaza la frecuencia resonancia a una frecuencia dónde la presencia armónica es mínima.



- Para una frecuencia próxima a la de resonancia se obtiene un comportamiento inductivo del sistema de manera que la impedancia es proporcional a  $k$ .

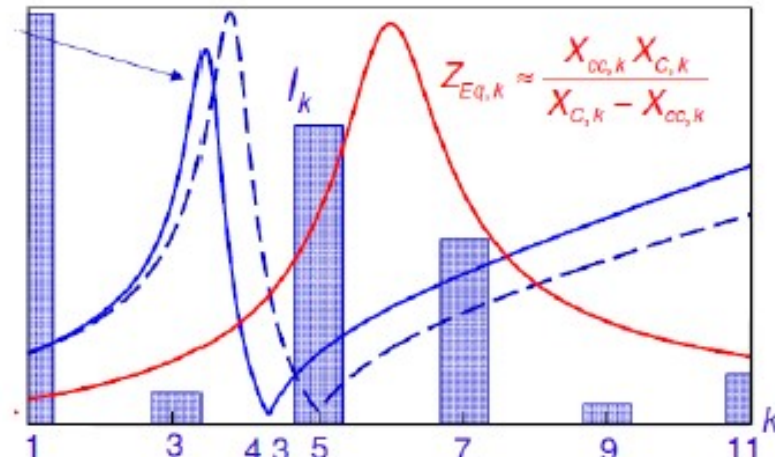


Fig. 12 Curva de la resonancia original en rojo, y curva de resonancia desplazada en azul. [6]

## 7. Modelización de la instalación y resultados

Para poder analizar cualquier circuito real complejo hay que conseguir convertirlo en un circuito más sencillo que se pueda estudiar con facilidad, y por lo tanto hay que realizar una serie de hipótesis. Para ello, hay que conseguir una simplificación de la realidad usando los conocimientos eléctricos y matemáticos que hagan falta. Así pues, el objetivo principal de la modelización es representar el circuito real de manera que sea posible hacer un análisis de armónicos mediante un software matemático. La idea es conseguir simplificar los esquemas unifilares del apartado VI a algo parecido como la Fig. 13, y posteriormente encontrar la impedancia de Thevenin y reducirlo como el circuito de la Fig. 14.

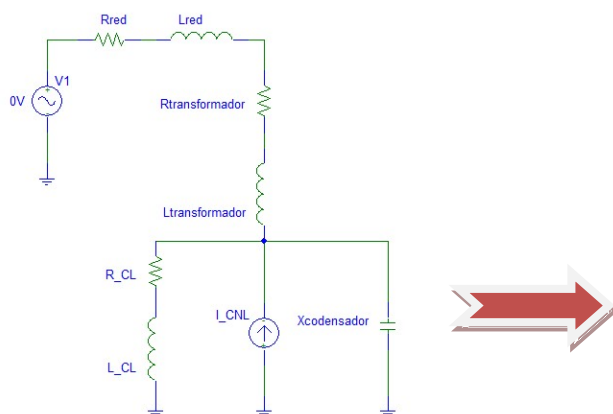


Fig. 13 Circuito real simplificado. CL (carga lineal). CNL (carga no lineal).

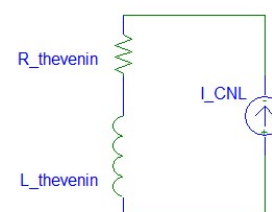


Fig. 14 Esquema simplificado. CNL (carga no lineal)

Los circuitos que se quieren modelar son los diferentes armarios eléctricos (TGBT-01 / TGBT-02 / TGBT-03 y TGBT-04) que se adjuntan en el apartado VI. El TGBT-05, no va a ser objeto de estudio ya que no contiene cargas no lineales y no tendría sentido hacer un estudio de armónicos como los demás.

Aquellos elementos que los diferentes armarios contienen y que hay que caracterizar son: la red de alimentación, transformadores, cargas lineales, cargas no lineales y batería de condensadores.

Los TGBT-03 y TGBT-04 son idénticos en cuanto a potencias y tipo de cargas, y servirán para introducir cómo se ha simplificado el circuito real para llevarlo a un caso académico. En el resto de casos se ha seguido el mismo criterio y solo se presentarán los valores.



## 7.1. TGBT-03 / TGBT-04

El TGBT-03 i el TGBT-04 son idénticos en cuanto a cargas y características del cuadro, por lo tanto haciendo el estudio de uno, se está haciendo el del otro a la vez. Ambos presentan un porcentaje en potencia de cargas no lineales (885 kW) que de cargas lineales (720 kW) recordando que el sistema tiene un  $\cos\phi=0.95$ .

### 7.1.1. Caracterización de la red

Del apartado 4.1 se puede extraer que la intensidad de cortocircuito es de 40000 A y la tensión de línea de la red es de 30 kV. Con estos datos ya se puede calcular la potencia de cortocircuito de la red:

$$S_{cc} = \sqrt{3} * U * I = \sqrt{3} * 30000 * 40000 = 2.0785 \times 10^9 \text{ VA} \quad (7.1)$$

A partir de la tensión de línea del secundario del transformador (400 V) y de la potencia de cortocircuito de la red se puede calcular el equivalente de Thévenin de la red. [7]

Para la frecuencia fundamental:

- Tensión de vacío fase-neutro: 
$$U_{0,1} = \frac{400}{\sqrt{3}} \text{ V} \quad (7.2)$$

- Impedancia de red: 
$$Z_{RED,1} = \frac{U_L^2}{S_{cc}} = \frac{400^2}{2.0785 \times 10^9} = 7.6980 \times 10^{-5} \Omega \quad (7.3)$$

A continuación, a partir de la impedancia se calcula sus componentes de resistencia y reactancia haciendo la aproximación habitual que la reactancia es 20 veces la resistencia:

$$\begin{cases} Z_{RED,1} = \sqrt{R_{RED,1}^2 + X_{RED,1}^2} \\ X_{RED,1} = 20 * R_{RED,1} \end{cases} \quad (7.4)$$

$$R_{RED,1} = \sqrt{\frac{Z_{RED,1}^2}{1 + 20^2}} = 3.8442 \times 10^{-6} \Omega \quad (7.5)$$

$$X_{RED,1} = 20 * R_{RED,1} = 7.6884 \times 10^{-5} \text{ j } \Omega \quad (7.6)$$

Para las frecuencias múltiples de la fundamental:

- Tensión de vacío fase-neutro:

$$U_{0,h} = 0 \text{ V} \quad (7.7)$$

- Impedancia de red:

$$Z_{RED,h} = 3.8442 \times 10^{-6} + h * 7.6884 \times 10^{-5} j \quad (7.8)$$

### 7.1.2. Caracterización del transformador

Del apartado 4.1 se pueden extraer las características del transformador y empezar a extraer valores. Para la frecuencia fundamental:

- Reactancia del transformador:  $X_{TR,1} = \frac{\epsilon_{cc} U_L^2}{S_n} = \frac{0.08 * 400^2}{200000} = j0.0064 \Omega \quad (7.9)$

Suponiendo que la parte resistiva es 10 veces menor que la reactancia:

$$R_{TR,1} = \frac{X_{TR,1}}{10} = 6,4 \times 10^{-4} \Omega \quad (7.10)$$

Para las frecuencias múltiples de la fundamental la impedancia entonces será:

$$Z_{TR,h} = 6,4 \times 10^{-4} + h * 0.0064 j \Omega \quad (7.11)$$

### 7.1.3. Caracterización de las cargas lineales (CL)

Para los cuadros TGBT-03 y TGBT-04 la potencia total que suman las cargas lineales (en este caso solo los arrancadores progresivos) es de 720kW y  $\cos\phi=0.95$ .

$$S_{CL} = \frac{P_{CL}}{\cos\phi} = \frac{720000}{0.95} = 757894 \text{ VA} \quad (7.12)$$

$$Q_{CL} = \sqrt{S_{CL}^2 - P_{CL}^2} = \sqrt{757894^2 - 720000^2} = 236650 \text{ VAr} \quad (7.13)$$

$$S_{CL} = 720000 \text{ kW} + 236650 j \text{ kVAr} \quad (7.14)$$

Para la frecuencia fundamental y suponiendo las cargas conectadas en estrella:



$$Z_{CL,1} = \frac{U_L^2}{S^*} = \frac{400^2}{720000 \text{ kW} - 236650j} = 0.2006 + 0.0659j \Omega \quad (7.15)$$

$$X_{CL,1} = 0.0659j \Omega \quad (7.16)$$

$$R_{CL,1} = 0.2006 \Omega \quad (7.17)$$

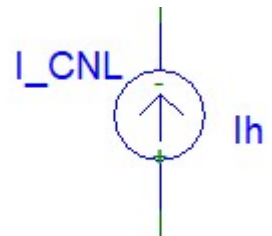
Para las frecuencias múltiples de la fundamental presenta los siguientes valores:

$$X_{CL,h} = \frac{0.0659j}{h} \Omega \quad (7.18)$$

$$R_{CL,h} = 0.2006 \Omega \quad (7.19)$$

#### 7.1.4. Caracterización de las cargas no lineales (CNL)

Las cargas no lineales suman una potencia de 885 kW y sumando sus intensidades, resulta una intensidad para la frecuencia fundamental de 1400.2 A. Estas serán modeladas como fuentes de corriente de frecuencia de orden “h”.



*Fig. 15 Fuente de corriente simulando CNL.*

Para saber llegar al valor de la corriente para cada armónico:

$$I_h = HD_h * I_1 \quad (7.20)$$

Las intensidades de cada armónico se muestran de esta manera la Tabla 15:

HD <sub>5</sub>	HD <sub>7</sub>	HD <sub>11</sub>	HD <sub>13</sub>	HD <sub>17</sub>	HD <sub>19</sub>	HD <sub>23</sub>	HD <sub>25</sub>	HD <sub>29</sub>
37.7%	13.4%	7.13%	3.41%	3.05%	1.93%	1.54%	1.27%	0.85%
I <sub>5</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>17</sub>	I <sub>19</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>25</sub>	I <sub>29</sub>
527.87 A	187.63 A	99.83 A	47.75 A	42.71 A	27.02 A	21.56 A	17.78 A	11.90 A

*Tabla 15 Espectro armónico y corrientes armónicas*

La tasa de distorsión armónica global en corriente ( $THDi$ ) es automático calcularla:

$$THDi(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h=29} I_h^2}}{I_1} * 100 = \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2 + I_{25}^2 + I_{29}^2}}{I_1} * 100 = 41\% \quad (7.21)$$

### 7.1.5. Caracterización de la batería de condensadores

Según el apartado 4.2.11, el TGBT-03 y el TGBT-04 tienen una batería de condensadores de 468kVAr cada uno. De la misma manera hay que encontrar sus valores de reactancia que a su vez será la impedancia total de la batería, ya que no se contempla parte resistiva.

Para la frecuencia fundamental:

$$X_{C,1} = \frac{U_L^2}{Q_c} = \frac{400^2}{468000} = 0.3419j \, \Omega \quad (7.22)$$

Para las frecuencias múltiples de la fundamental:

$$X_{C,h} = \frac{0.3419j}{h} \Omega \quad (7.23)$$

### 7.1.6. Circuito – $Z_{thevenin}$

Del circuito de la Fig. 13 hay que conseguir transformarlo en el circuito de la Fig. 14. Para hacerlo hay que sacar la  $Z_{thevenin}$  vista desde la carga no lineal y toma la siguiente expresión:

$$Y_h = \frac{1}{Z_{RED,h} + Z_{TR,h}} + \frac{1}{Z_{CL,h}} + \frac{1}{X_{C,h}} \quad (7.24)$$

$$Y_h = \frac{1}{R_{RED} + R_{TR} + h * (X_{RED} + X_{TR})j} + \frac{1}{R_{CL} + h * X_{CL} * j} + \frac{1}{\frac{-j * X_C}{h}} \quad (7.25)$$

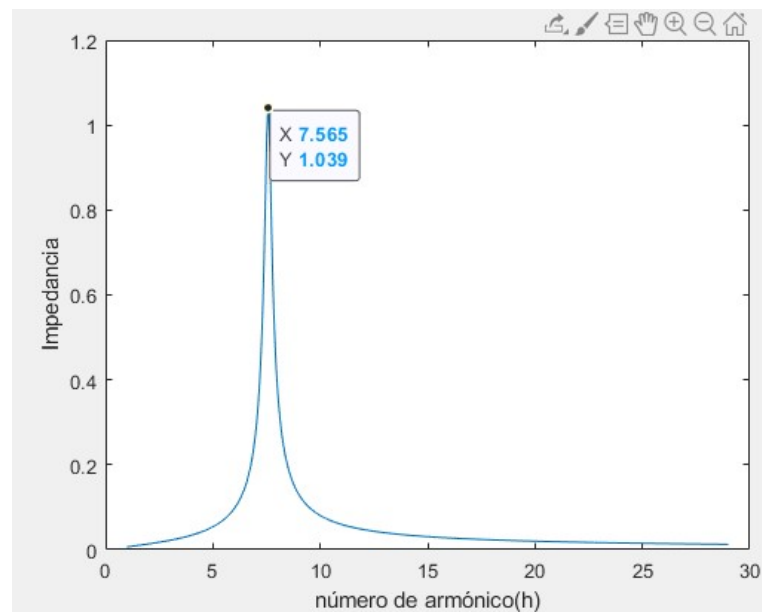
$$Y_h = \frac{1}{3.8442 \times 10^{-6} + 6,4 \times 10^{-4} + h * (7.6884 \times 10^{-5} + 0.0064)j} + \frac{1}{0.2006 + h * 0.0659 * j} + \frac{1}{\frac{-j * 0.3419}{h}} \quad (7.26)$$

$$Z_h = \frac{1}{Y_h} \quad (7.27)$$

Dando valores de “h” hasta h=29, se saca la siguiente gráfica de la impedancia (Fig. 16):







*Fig. 16 Grafica de la impedancia en función del armónico (h)*

### 7.1.7. Resultados

De la Fig. 16 se puede ver que la impedancia a la frecuencia de resonancia se encuentra en torno al séptimo armónico ( $h=7.565$  378Hz), y adopta un valor muy elevado al acercarse a esa frecuencia mientras que cuando se aleja toma valores de impedancia muy bajos.

Obtenidos los resultados anteriores se pueden realizar unas verificación rápida para ver si los cálculos están bien realizados, y sirve también para dar un valor aproximado de en qué armónico se encuentra el máximo valor de la impedancia de resonancia [6].

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_{RED} + X_{TRAFO}}} = 7.26 \quad (7.28)$$

Se observa entonces según la Fig. 16 y la ecuación (7.28) que los valores son cercanos y que entonces los cálculos se puede considerar que están correctos.

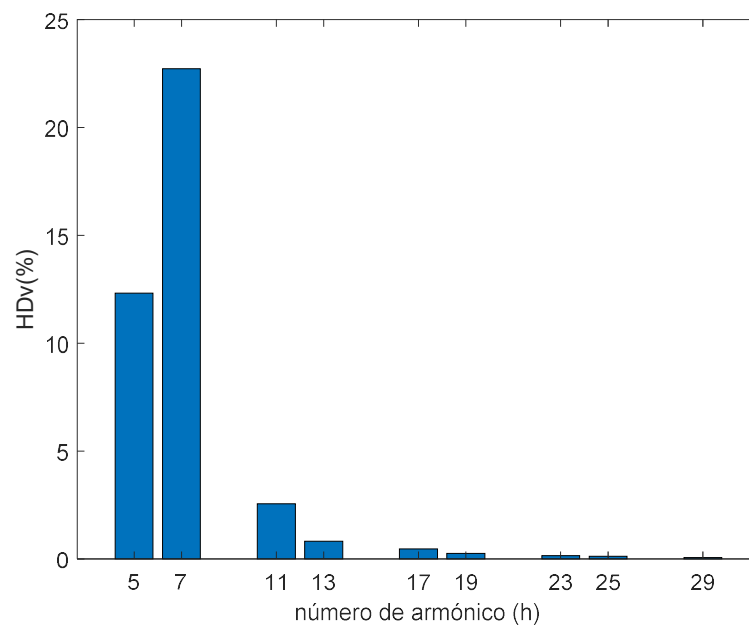
Conociendo los valores de la impedancia para cada armónico y las corrientes armónicas se puede encontrar las tensiones armónicas para cada armónico mediante la siguiente expresión:

$$V_h = I_h * Z_h \quad (7.29)$$

Sus valores quedan recogidos en la Tabla 16 y la gráfica representativa de las tensiones armónicas en % en función del número de armónico se observa en la Fig. 17:

	<b>h=5</b>	<b>h=7</b>	<b>h=11</b>	<b>h=13</b>	<b>h=17</b>	<b>h=19</b>	<b>h=23</b>	<b>h=25</b>	<b>h=29</b>
<b>I<sub>h</sub> (A)</b>	527.87	187.63	99.83	47.75	42.71	27.02	21.56	17.78	11.9
<b>Z<sub>h</sub> (Ω)</b>	0.0057 + 0.0536j	0.0865 + 0.2660j	0.0017 - 0.0593j	0.0006 - 0.0399j	0.0001 - 0.0251j	0.0001 - 0.0214j	0.0000 - 0.0167j	0.0000 - 0.0151j	0.0000 - 0.0127j
<b> Z<sub>h</sub>  (Ω)</b>	0.0539	0.2797	0.0593	0.0399	0.0251	0.0214	0.0167	0.0151	0.0127
<b>V<sub>h</sub> (V)</b>	28.44	52.48	5.91	1.9	1.1	0.58	0.36	0.27	0.15

*Tabla 16 Valores de corriente, impedancia y tensión para cada armónico.*



*Fig. 17 Tensiones armónicas por cada armónico.*

La tasa de distorsión armónica global en tensión (*THDu*) es automático calcularla:

$$THDu(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h=29} V_h^2}}{\frac{U_1}{\sqrt{3}}} * 100 = \frac{\sqrt{V_5^2 + V_7^2 + V_{11}^2 + V_{13}^2 + V_{17}^2 + V_{19}^2 + V_{23}^2 + V_{25}^2 + V_{29}^2}}{V_1} * 100 = 26\% \quad (7.30)$$



Los armarios eléctricos TGBT-03 y TGBT-04 presentan varios problemas de armónicos según los cálculos hechos. Por un lado, presentan una impedancia de resonancia muy elevada entorno al séptimo armónico, que sumado a las corrientes armónicas que producen los variadores provoca una tasa global de distorsión armónica de tensión ( $THDu=26\%$ ) fuera de los rangos establecidos por la normativa vigente (ver anexo VII).

Como resultado de esto, hará falta tomar medidas de corrección para que estos problemas sean mitigados con éxito.

## 7.2. TGBT-01

El TGBT-01 es un cuadro eléctrico que a la vez alimenta diferentes cuadros. Las cargas lineales suman una potencia de 422 kW y las cargas no lineales de 553 kW recordando que el sistema tiene un  $\cos\phi=0.95$ . Además dispone de una batería de condensadores de 284 kVAr.

### 7.2.1. Simplificación del circuito eléctrico

- El método de simplificación del circuito eléctrico es el mismo que en los apartados anteriores. La impedancia de red toma los mismos valores que el apartado 7.1.1:

$$Z_{RED,h} = 3.8442 \times 10^{-6} + h * 7.6884 \times 10^{-5}j \quad (7.8)$$

- La impedancia del transformador, al ser el transformador TR-01 de una potencia menor (1600 kVA) que el del apartado 7.1.2 toma valores diferentes:

$$X_{TR,h} = h * 0.008j \Omega \quad (7.31)$$

$$R_{TR,h} = 8 \times 10^{-4} \Omega \quad (7.32)$$

$$Z_{TR,h} = 8 \times 10^{-4} + h * 0.008j \Omega \quad (7.33)$$

- Las cargas lineales, todas sumadas acumulan una potencia de 422 kW presenta los siguientes valores:

$$X_{CL,h} = h * 0.1125j \Omega \quad (7.34)$$

$$R_{CL,h} = 0.3422 \Omega \quad (7.35)$$

$$Z_{CL,h} = 0.3422 + h * 0.1125j \Omega \quad (7.36)$$

- Las cargas no lineales igual que en el apartado 7.1.4, se modelan como una fuente de corriente y suman una potencia de 553 kW. Esto se traduce en que su intensidad para la frecuencia fundamental es de 898.7 A y por lo tanto las corrientes para cada armónico quedan recogidas en la Tabla 17:

HD <sub>5</sub>	HD <sub>7</sub>	HD <sub>11</sub>	HD <sub>13</sub>	HD <sub>17</sub>	HD <sub>19</sub>	HD <sub>23</sub>	HD <sub>25</sub>	HD <sub>29</sub>
37.7%	13.4%	7.13%	3.41%	3.05%	1.93%	1.54%	1.27%	0.85%
I <sub>5</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>17</sub>	I <sub>19</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>25</sub>	I <sub>29</sub>
338.81 A	120.43 A	64.08 A	30.65 A	27.41 A	17.35 A	13.84 A	11.41 A	7.64 A

*Tabla 17 Espectro armónico del ATV-71 y corrientes armónicas.*

La tasa de distorsión armónica en corriente no varía:

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h=29} I_h^2}}{I_1} * 100 = \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2 + I_{25}^2 + I_{29}^2}}{I_1} * 100 = 41\% \quad (7.21)$$

- La batería de condensadores de 284 kVAr presenta el siguiente valor de reactancia capacitiva:

$$X_{C,h} = \frac{0.5634j}{h} \Omega \quad (7.37)$$

### 7.2.2. Circuito – Z<sub>thevenin</sub>

Igual que en apartado 7.1.6 del circuito de la Fig. 13 hay que conseguir transformarlo en el circuito de la Fig. 14. Para hacerlo hay que sacar la Z<sub>thevenin</sub> vista desde la carga no lineal y toma la siguiente expresión:



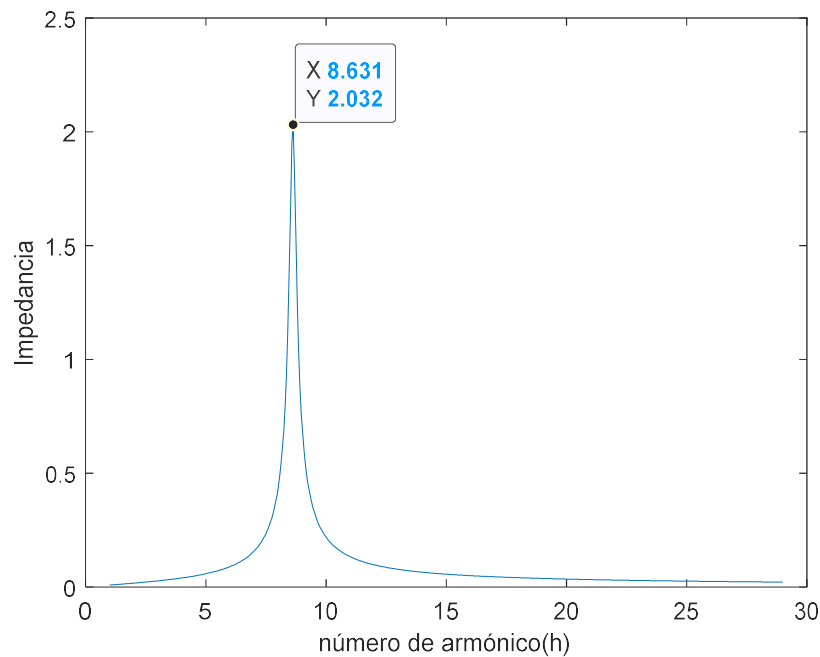
$$Y_h = \frac{1}{Z_{RED,h} + Z_{TR,h}} + \frac{1}{Z_{CL,h}} + \frac{1}{X_{C,h}} \quad (7.24)$$

$$Y_h = \frac{1}{R_{RED} + R_{TR} + h * (X_{RED} + X_{TR})j} + \frac{1}{R_{CL} + h * X_{CL} * j} + \frac{1}{\frac{-j * X_C}{h}} \quad (7.25)$$

$$Y_h = \frac{1}{3.8442 \times 10^{-6} + 8 \times 10^{-4} + h * (7.6884 \times 10^{-5} + 0.008)j} + \frac{1}{0.3422 + h * 0.1125 * j} + \frac{1}{\frac{-j * 0.5634}{h}} \quad (7.38)$$

$$Z_h = \frac{1}{Y_h} \quad (7.27)$$

Dando valores de “h” hasta h=29, se saca la siguiente gráfica de la impedancia:



*Fig. 18 Impedancia en función de los armónicos.*

### 7.2.3. Resultados

De la Fig. 18 se puede ver que la impedancia a la frecuencia de resonancia se encuentra cercano al noveno armónico ( $h=8.631$  432 Hz) y adopta un valor muy elevado al acercarse a esa frecuencia mientras que cuando se aleja toma valores de impedancia muy bajos.

Obtenidos los resultados anteriores se pueden realizar unas verificación rápida para ver si los cálculos están bien realizados, y sirve también para dar un valor aproximado de en qué

armónico se encuentra el máximo valor de la impedancia a la frecuencia de resonancia [6].

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_{RED} + X_{TRAFO}}} = 8.352 \quad (7.39)$$

Se observa entonces según la Fig. 18 y la ecuación (7.39) que los valores son cercanos y que entonces los cálculos se puede considerar que están correctos.

Conociendo los valores de la impedancia para cada armónico y las corrientes armónicas se puede encontrar las tensiones armónicas para cada armónico mediante la siguiente expresión:

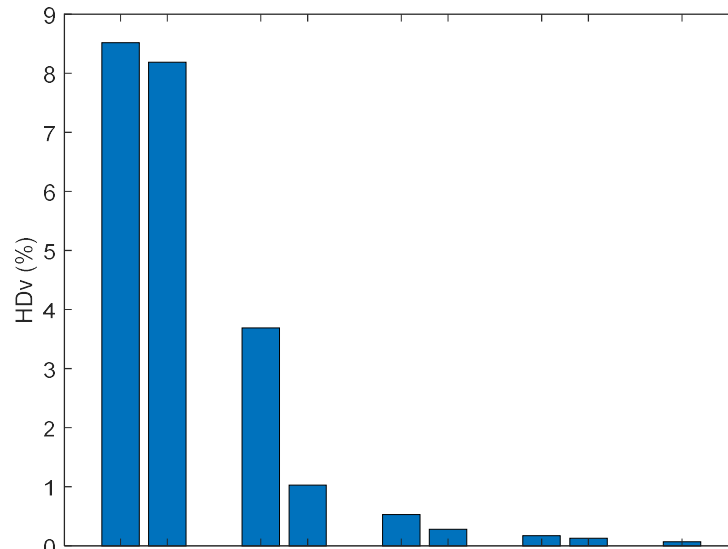
$$V_h = I_h * Z_h \quad (7.29)$$

Los valores de tensión armónica, impedancia y corrientes armónicas quedan recogidos en la Tabla 18 y la gráfica de las tensiones armónicas en % para cada armónico se adjunta en la Fig. 19:

	<b>h=5</b>	<b>h=7</b>	<b>h=11</b>	<b>h=13</b>	<b>h=17</b>	<b>h=19</b>	<b>h=23</b>	<b>h=25</b>	<b>h=29</b>
<b>I<sub>h</sub> (A)</b>	338.81 A	120.43 A	64.08 A	30.65 A	27.41 A	17.35 A	13.84 A	11.41 A	7.64 A
<b>Z<sub>h</sub> (Ω)</b>	0.0043 + 0.0579i	0.0177 + 0.1561i	0.0055 - 0.1328i	0.0013 - 0.0775i	0.0003 - 0.0447i	0.0001 - 0.0374i	0.0001 - 0.0285i	0.0000 - 0.0256i	0.0000 - 0.0213i
<b> Z<sub>h</sub> (Ω)</b>	0.0581	0.1571	0.1329	0.0775	0.0447	0.0374	0.0285	0.0256	0.0213
<b>V<sub>h</sub> (V)</b>	19.67	18.91	8.51	2.37	1.22	0.65	0.39	0.29	0.16

*Tabla 18 Valores de corriente, impedancia y tensión para cada armónico.*





*Fig. 19 Valores de tensión armónica para cada armónico.*

La tasa de distorsión armónica global en tensión ( $THDu$ ) es automático calcularla:

$$THDu(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h=29} V_h^2}}{\frac{U_1}{\sqrt{3}}} * 100 = \frac{\sqrt{V_5^2 + V_7^2 + V_{11}^2 + V_{13}^2 + V_{17}^2 + V_{19}^2 + V_{23}^2 + V_{25}^2 + V_{29}^2}}{V_1} * 100 = 12.44\% \quad (7.40)$$

El armario eléctrico TGBT-01 presenta varios problemas de armónicos según los cálculos hechos. Por un lado, presenta una impedancia de resonancia muy elevada entorno al noveno armónico, que sumado a las corrientes armónicas que producen los variadores provoca una tasa global de distorsión armónica de tensión ( $THDu=12.44\%$ ) fuera de los rangos establecidos por la normativa vigente (ver anexo VII).

Como resultado de esto, hará falta tomar medidas de corrección para que estos problemas sean mitigados con éxito.

### 7.3. TGBT-02

El TGBT-02 es un cuadro eléctrico que a la vez alimenta diferentes cuadros. Las cargas lineales suman una potencia de 662 kW y las cargas no lineales de 485 kW recordando que el sistema tiene un  $\cos\phi=0.95$ . Además dispone de una batería de condensadores de 300 kVAr.

### 7.3.1. Simplificación del circuito eléctrico

- El método de simplificación del circuito eléctrico es el mismo que en los apartados anteriores. La impedancia de red toma los mismos valores que el apartado 7.1.1:

$$Z_{RED,h} = 3.8442 \times 10^{-6} + h * 7.6884 \times 10^{-5} j \quad (7.8)$$

- La impedancia del transformador presenta los mismos valores que el apartado 7.2.1 ya que los transformadores son idénticos:

$$X_{TR,h} = h * 0.008 j \Omega \quad (7.31)$$

$$R_{TR,h} = 8 \times 10^{-4} \Omega \quad (7.32)$$

$$Z_{TR,h} = 8 \times 10^{-4} + h * 0.008 j \Omega \quad (7.33)$$

- Las cargas lineales, todas sumadas acumulan una potencia de 422kW presenta los siguientes valores:

$$X_{CL,h} = h * 0.0717 j \Omega \quad (7.41)$$

$$R_{CL,h} = 0.2181 \Omega \quad (7.42)$$

$$Z_{CL,h} = 0.2181 + h * 0.0717 j \Omega \quad (7.43)$$

- Las cargas no lineales igual que en el apartado 7.1.4 se modelan como una fuente de corriente y suman una potencia de 485 kW y sumando sus intensidades, resulta una intensidad para la frecuencia fundamental de 794 A y por lo tanto las corrientes para cada armónico quedan recogidas en la Tabla 19:

HD <sub>5</sub>	HD <sub>7</sub>	HD <sub>11</sub>	HD <sub>13</sub>	HD <sub>17</sub>	HD <sub>19</sub>	HD <sub>23</sub>	HD <sub>25</sub>	HD <sub>29</sub>
37.7%	13.4%	7.13%	3.41%	3.05%	1.93%	1.54%	1.27%	0.85%
I <sub>5</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>11</sub>	I <sub>13</sub>	I <sub>17</sub>	I <sub>19</sub>	I <sub>23</sub>	I <sub>25</sub>	I <sub>29</sub>
299.53 A	106.46 A	56.65 A	27.09 A	24.23 A	15.33 A	12.23 A	10.09 A	6.75 A

*Tabla 19 Espectro armónico del ATV-71 y corrientes armónicas.*





La tasa de distorsión armónica en corriente:

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h=29} I_h^2}}{I_1} * 100 = \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2 + I_{25}^2 + I_{29}^2}}{I_1} * 100 = 41\% \quad (7.21)$$

- La batería de condensadores de 300 kVAr presenta el siguiente valor de reactancia capacitiva:

$$X_{C,h} = \frac{0.5333j}{h} \Omega \quad (7.44)$$

### 7.3.2. Circuito – $Z_{\text{thevenin}}$

Igual que en apartado 7.1.6 del circuito de la Fig. 13 hay que conseguir transformarlo en el circuito de la Fig. 14. Para hacerlo hay que sacar la  $Z_{\text{thevenin}}$  vista desde la carga no lineal y toma la siguiente expresión:

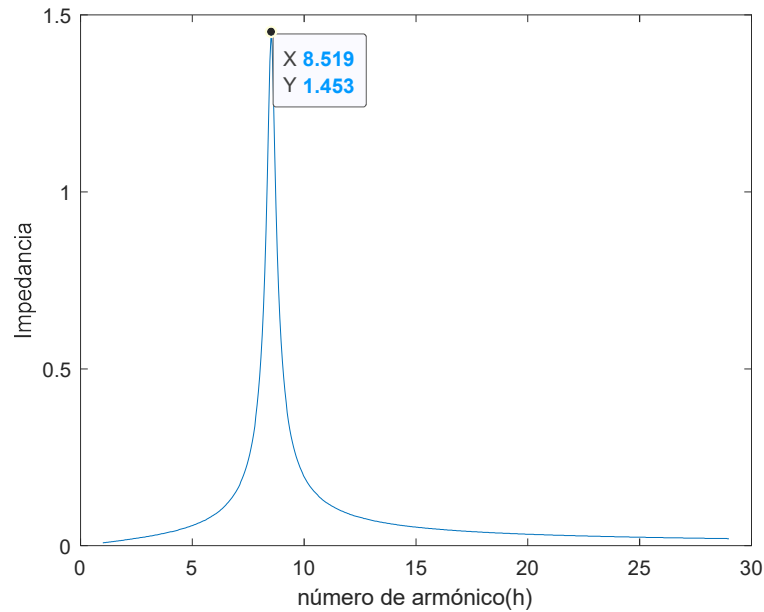
$$Y_h = \frac{1}{Z_{RED,h} + Z_{TR,h}} + \frac{1}{Z_{CL,h}} + \frac{1}{X_{C,h}} \quad (7.24)$$

$$Y_h = \frac{1}{R_{RED} + R_{TR} + h * (X_{RED} + X_{TR})j} + \frac{1}{R_{CL} + h * X_{CL} * j} + \frac{1}{\frac{-j * X_C}{h}} \quad (7.25)$$

$$Y_h = \frac{1}{3.8442 \times 10^{-6} + 8 \times 10^{-4} + h * (7.6884 \times 10^{-5} + 0.008)j} + \frac{1}{0.2181 + h * 0.0717j} + \frac{1}{\frac{-j * 0.5333}{h}} \quad (7.45)$$

$$Z_h = \frac{1}{Y_h} \quad (7.27)$$

Dando valores de “h” hasta h=29, se saca la siguiente gráfica de la impedancia (Fig. 20):



*Fig. 20 Impedancia en función de los armónicos.*

### 7.3.3. Resultados

De la Fig. 20 se puede ver que la impedancia a la frecuencia de resonancia se encuentra cercano al noveno armónico ( $h=8.519$  426 Hz) y adopta un valor muy elevado al acercarse a esa frecuencia mientras que cuando se aleja toma valores de impedancia muy bajos.

Obtenidos los resultados anteriores se pueden realizar una verificación rápida:

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_{RED} + X_{TRAFO}}} = 8.1260 \quad \begin{matrix} (7.22) \\ (7.46) \end{matrix}$$

Se observa entonces según la Fig. 20 y la ecuación (7.39) que los valores son cercanos y que entonces los cálculos se puede considerar que están correctos.

Conociendo los valores de la impedancia para cada armónico y las corrientes armónicas se puede encontrar las tensiones armónicas para cada armónico mediante la siguiente expresión:

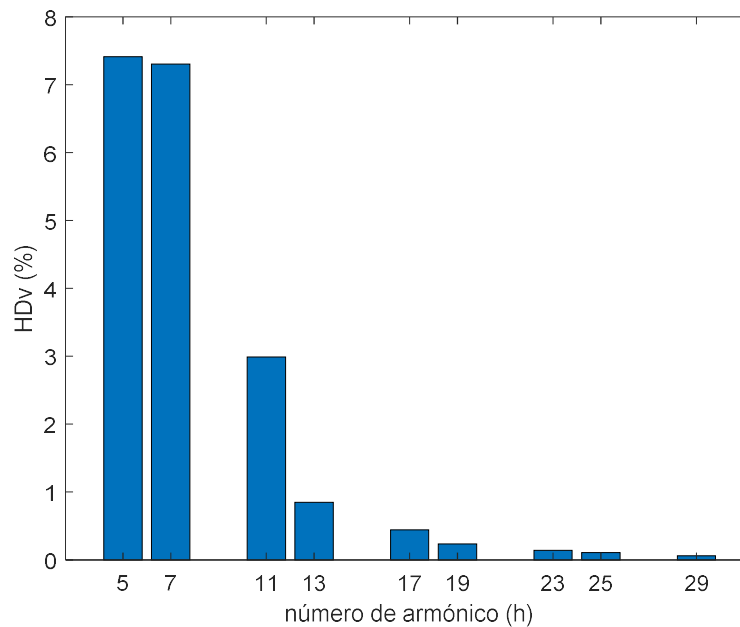
$$V_h = I_h * Z_h \quad (7.29)$$

En la Tabla 20 se recogen los diferentes resultados de tensión, impedancia y corriente armónica y en la Fig. 21 la gráfica de tensiones armónicas en % para cada armónico:



	<b>h=5</b>	<b>h=7</b>	<b>h=11</b>	<b>h=13</b>	<b>h=17</b>	<b>h=19</b>	<b>h=23</b>	<b>h=25</b>	<b>h=29</b>
<b>I<sub>h</sub> (A)</b>	299.53 A	106.46 A	56.65 A	27.09 A	24.23 A	15.33 A	12.23 A	10.09 A	6.75 A
<b>Z<sub>h</sub> (Ω)</b>	0.0057 + 0.0569j	0.0246 + 0.1565j	0.0064 - 0.1217j	0.0016 - 0.0722j	0.0003 - 0.0420j	0.0002 - 0.0352j	0.0001 - 0.0269j	0.0001 - 0.0242j	0.0000 - 0.0201j
<b> Z<sub>h</sub>  (Ω)</b>	0.0571	0.1585	0.1219	0.0723	0.0420	0.0352	0.0269	0.0242	0.0201
<b>V<sub>h</sub> (V)</b>	17.12	16.87	6.90	1.96	1.02	0.54	0.33	0.24	0.14

*Tabla 20 Valores de corriente, impedancia y tensión para cada armónico.*



*Fig. 21 Valores de tensión armónica para cada armónico.*

La tasa de distorsión armónica global en tensión (*THDu*) es automático calcularla:

$$THDu(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h=29} V_h^2}}{\frac{U_1}{\sqrt{3}}} * 100 = \frac{\sqrt{V_5^2 + V_7^2 + V_{11}^2 + V_{13}^2 + V_{17}^2 + V_{19}^2 + V_{23}^2 + V_{25}^2 + V_{29}^2}}{V_1} * 100 = 10.87\% \quad (7.40)$$

El armario eléctrico TGBT-02 presenta varios problemas de armónicos según los cálculos hechos. Por un lado, presentan una impedancia de resonancia muy elevada entorno al noveno armónico, que sumado a las corrientes armónicas que producen los variadores

provoca una tasa global de distorsión armónica de tensión ( $THDu=10.87\%$ ) fuera de los rangos establecidos por la normativa vigente (ver anexo VII).

Como resultado de esto, hará falta tomar medidas de corrección para que estos problemas sean mitigados con éxito.



## 8. VALORACIÓN DE SOLUCIONES

El objetivo de este punto es valorar aquellas soluciones que ofrece el mercado para poder reducir la presencia armónica. Por lo tanto, hay que realizar una exploración en el mercado de cuales son aquellos dispositivos que están disponibles, sus características, y en qué situaciones el fabricante recomienda su instalación. Igual que en los apartados anteriores se ha estudiado la presencia de armónicos en la instalación con el Matlab, en este apartado se implementarán estas mejoras introduciéndolas en el programa y viendo cuál es el impacto de las mismas.

Las dos mejoras que se proponen son el filtro activo y el filtro pasivo.

### 8.1. TGBT-03 / TGBT-04

Estos dos armarios presentan unas tasas de distorsión armónica en tensión ( $THDu$ ) muy elevadas por igual (26%). A parte, los transformadores que los alimentan están al 84% de su capacidad, y sumado a que el porcentaje de cargas no lineales frente al de cargas lineales es mayor y que la tasa de distorsión armónica ( $THDi$ ) es del 41% hace pensar que hace falta corregir sobretodo el efecto de corrientes armónicas.

#### 8.1.1. Filtro pasivo

Simular el efecto en la instalación de un filtro pasivo en Matlab es sencillo. A nivel de programación solo hace falta cambiar el valor de la reactancia del condensador ( $X_{condensador}$ ) y introducir una nueva variable en el programa de cálculo que sea la reactancia de la bobina del filtro ( $X_{filtro}$ ).

El modelo escogido es el llamado (VLVAF6P03520AB) tiene un frecuencia de sintonización ( $Krs, F$ ) de 190Hz (orden 3.78), una potencia reactiva de 500 kVAr (ver anexo IX).

El circuito del filtro simplificado sería el de la Fig. 22 dónde la parte resistiva del mismo es tan pequeña que no se considera:

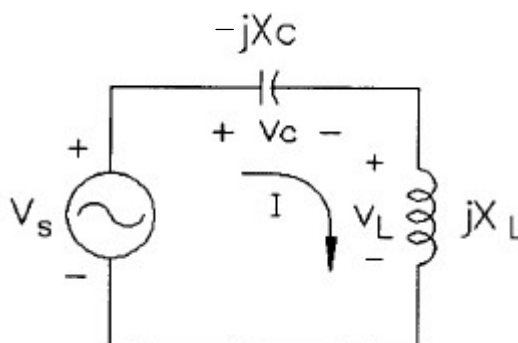


Fig. 22 Circuito LC.

Para entender el circuito un poco más hace falta introducir que para la frecuencia de sintonización la potencia reactiva es cero ( $Q=0$ ) y por lo tanto la parte imaginaria del filtro también lo es:

$$Z_{filtro} = R + j(X_L * K_{rs,F} - \frac{X_c}{K_{rs,F}}) \quad (8.01)$$

$$j\left(X_L * K_{rs,F} - \frac{X_c}{K_{rs,F}}\right) = 0 \rightarrow X_L = \frac{X_c}{K_{rs,F}^2} \quad (8.02)$$

Del circuito de la Fig. 22 hace falta remarcar que se trabaja con tensiones de fase y se puede hacer la siguiente simplificación:

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{U}{\sqrt{3}} - U_L = \frac{U}{\sqrt{3}} - X_L * I = \frac{U}{\sqrt{3}} - X_L \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{|X_L - X_c|} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{3}} - X_L \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{|X_L - K_{rs}^2 X_L|} = \frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{|1 - K_{rs}^2|} = \left| \frac{\frac{U}{\sqrt{3}} * K_{rs}^2}{1 - K_{rs}^2} \right| \end{aligned} \quad (8.03)$$

Entonces usando la ecuación 7.22 y sustituyendo se puede encontrar el valor de la reactancia capacitiva del filtro. Hay que observar con importante importancia que en la ecuación 7.22 la tensión es de línea, por lo tanto hace falta multiplicarla por raíz de 3.

$$X_{C,1} = \frac{\left(\left(\sqrt{3} \frac{U}{\sqrt{3}}\right) * \frac{K_{rs,F}^2}{(K_{rs,F}^2 - 1)}\right)^2}{Q_{F,1}} = \frac{\left(\left(\sqrt{3} \frac{400}{\sqrt{3}}\right) * \frac{3.78^2}{(3.78^2 - 1)}\right)^2}{500000} = 0.37 \, \Omega \quad (8.04)$$

Y entonces encontrar el valor de la reactancia inductiva y el valor de su resistencia es automático:

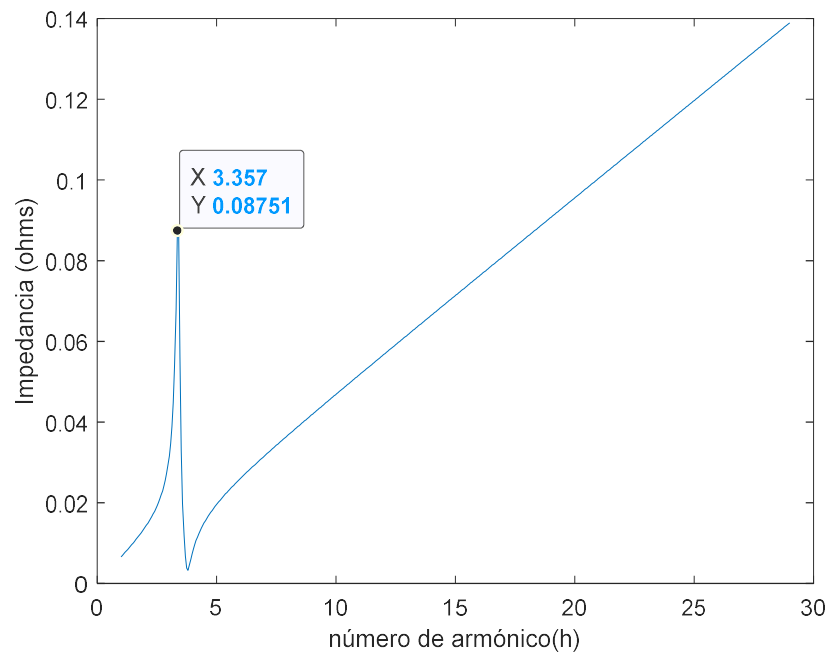
$$X_{L,1} = \frac{X_{C,1}}{K_{rs,F}^2} = \frac{0.3441}{3.78^2} = 0.0259 \, \Omega \quad (8.05)$$

$$L = \frac{X_{L,1}}{100\pi} = 82.42 \, \mu H \quad (8.06)$$

$$R = \frac{K_{rs,F} * X_{L,1}}{q} = 0.0033 \, \Omega \quad (8.07)$$

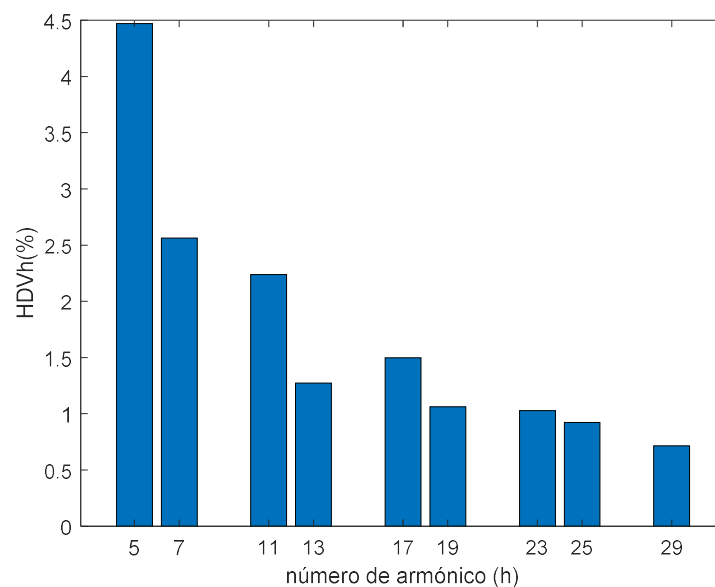
Introduciendo los nuevos valores en la ecuación de la impedancia del sistema, la evolución de la impedancia sería como la de la figura Fig. 23:





*Fig. 23 Desplazamiento de la frecuencia de resonancia por efecto del filtro pasivo.*

El valor de la distorsión armónica en tensión ( $THDu$ ), después de implementar el filtro pasivo toma un valor de 6.24%, y la distorsión para cada armónico en voltaje se recoge en la Fig. 24:



*Fig. 24 Distorsiones armónicas en tensión para cada armónico con el filtro pasivo.*

Comparando la impedancia del sistema y las distorsiones armónicas en tensión para cada armónico, sin filtro y con filtro, quedarían unos gráficos como los de la Fig. 25 y Fig. 26:

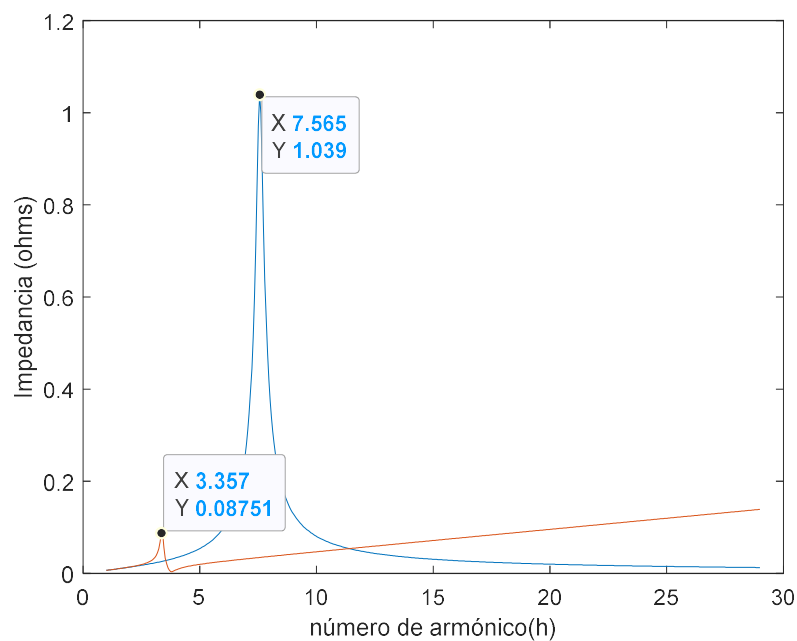


Fig. 25 Frecuencia de resonancia sin filtro (azul) y con filtro (rojo).

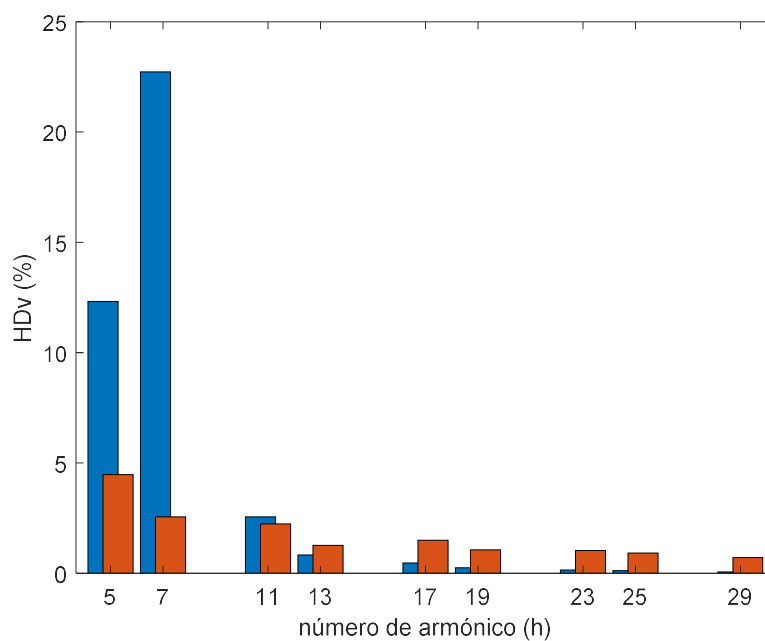


Fig. 26 Caídas de tensión para cada armónico sin filtro (azul) y con filtro (rojo).

Los resultados obtenidos muestran que:

- El pico de resonancia se desplaza a una frecuencia cercana a la de sintonización del filtro.





- El valor de la impedancia fa la frecuencia de resonancia se reduce drásticamente.
- Alrededor de los 200Hz el filtro tiene un comportamiento inductivo y se comporta linealmente.
- La tasa de distorsión armónica en tensión (THDu) disminuye considerablemente por efecto del filtro pasivo pero no llegando a valores aceptables según anexo VII. Además se observa que para armónicos elevados, las caídas de tensión son mayores con filtro que sin filtro debido al comportamiento inductivo como se puede ver en la Fig. 23.
- Las distorsiones armónicas individuales se reducen de forma notable.

Como conclusión este filtro analizado no es apto para estos armarios eléctricos ya que *THDu* es superior al 5%, y no estaría cumpliendo normativa (anexo VII).

Aprovechando el cálculo y probando con un filtro de la misma marca pero que sintonice a una frecuencia diferente tal como 210Hz (orden 4.2), se comprueba que tampoco es suficiente como para reducir *THDu* por debajo del 5%.

El hecho de que ningún filtro pasivo estudiado sirviera hace pensar que es necesario reducir la corriente armónica.

### 8.1.2. Filtro activo

El filtro activo descrito con anterioridad, es muy efectivo pero a la vez también de un coste muy elevado. Su tarea sería analizar las corrientes armónicas, e introducir esas mismas corrientes desfasadas 180° para conseguir anularlas.

El filtro activo que se propone es de la gama AccuSine PCS+ (anexo XI). Tiene la capacidad de compensar potencia reactiva y a su vez eliminar corrientes armónicas.

La intensidad destinada a compensar el  $\cos\phi$ :

$$I_r = \frac{Q}{\sqrt{3} * U} = \frac{468 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 675,5 \text{ A} \quad (8.08)$$

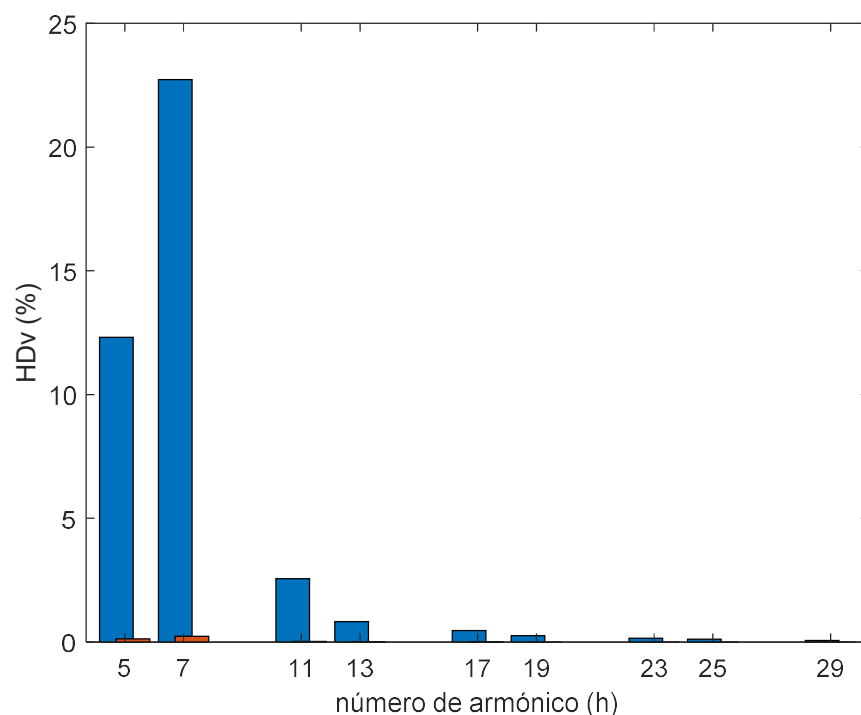
La intensidad destinada a eliminar armónicos queda recogida en la siguiente tabla:

$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$	$I_{17}$	$I_{19}$	$I_{23}$	$I_{25}$	$I_{29}$
527.87 A	187.63 A	99.83 A	47.75 A	42.71 A	27.02 A	21.56 A	17.78 A	11.90 A

Tabla 21 Corrientes armónicas.

$$I_{ef} = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2 + I_{25}^2 + I_{29}^2} = 574.1 A \quad (8.09)$$

Para conseguir simular el efecto que tendría el filtro activo en el sistema, lo que hace falta hacer es reducir las corrientes armónicas un cierto porcentaje que será un 99%. Aplicando esta medida las distorsiones armónicas en tensión por cada armónico se reducen considerablemente debido al efecto del filtro activo como se observa en la Fig. 27:



*Fig. 27 Distorsiones armónicas en tensión por cada armónico sin filtro (azul) y con filtro (rojo).*

Y el valor de  $THDu$  pasa a ser 0.2%. Muy por debajo del 5% que estipula la normativa vigente, por lo tanto, esta sería una buena medida para solucionar los armónicos aunque sea la más cara.

En conclusión, de las dos medidas propuestas el filtro activo en estos dos armarios es el que se adecua más y sería el único apto de las dos soluciones estudiadas, ya que aparte de mejorar  $THDu$ , también mejoraría el  $THDi$ , eliminando cualquier posibilidad de mal funcionamiento de alguna parte de la instalación debida a la presencia de corrientes armónicas no deseadas.



## 8.2. TGBT-01

### 8.2.1. Filtro pasivo

Escogiendo el modelo (VLVAF5P03518AB) que tiene una frecuencia de sintonización ( $K_{rs,F}$ ) de 190Hz (orden 3,78), una potencia reactiva de 300kVAr (ver anexo IX). Introduciendo estos valores al Matlab y calculando se obtiene que un valor de  $THDu > 5\%$ , y por lo tanto no estaría cumpliendo normativa:

$$THD_{u,190Hz}(\%) = 5.47\% \quad (8.10)$$

En cambio usando, un filtro de la misma potencia que tenga una frecuencia de sintonización ( $K_{rs,F}$ ) de 210 Hz (orden 4.2) la instalación adopta valores aceptables.

El valor de la reactancia capacitiva, inductiva y la resistencia del filtro se pueden obtener fácilmente usando el método del apartado 8.1.1:

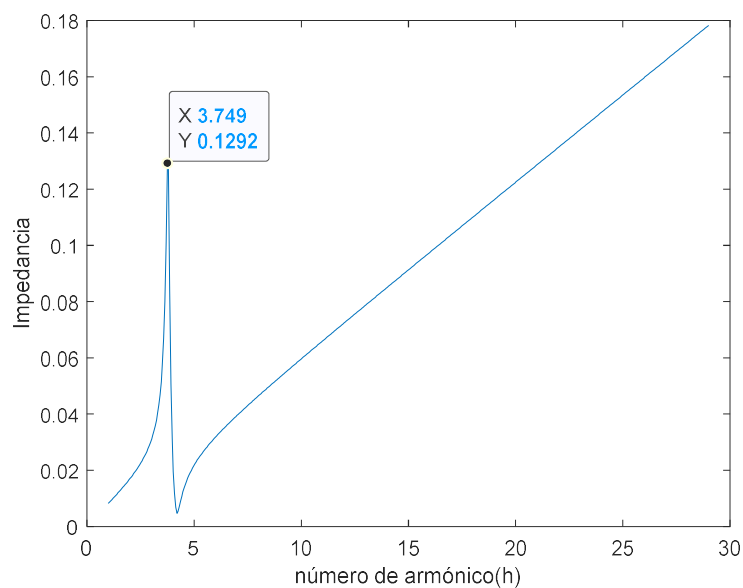
$$X_{C,1} = \frac{\left( \left( \sqrt{3} \frac{U}{\sqrt{3}} \right) * \frac{K_{rs,F}^2}{(K_{rs,F}^2 - 1)} \right)^2}{Q_{F,1}} = \frac{\left( \left( \sqrt{3} \frac{400}{\sqrt{3}} \right) * \frac{4.2^2}{(4.2^2 - 1)} \right)^2}{300000} = 0.5994 \Omega \quad (8.11)$$

$$X_{L,1} = \frac{X_{C,1}}{K_{rs,F}^2} = \frac{0.5994}{4.2^2} = 0.034 \Omega \quad (8.12)$$

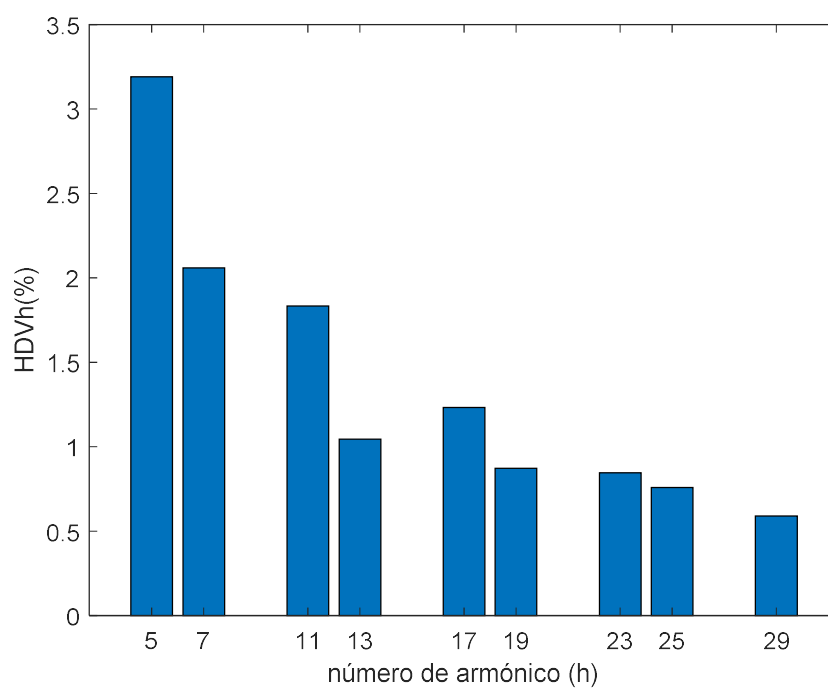
$$L = \frac{X_{L,1}}{100\pi} = 108.15 \mu H \quad (8.13)$$

$$R = \frac{K_{rs,F} * X_{L,1}}{q} = 0.0048 \Omega \quad (8.14)$$

Introduciendo los nuevos valores en la ecuación de la impedancia del sistema, la evolución de la impedancia queda reflejada en la Fig. 28. El valor de la distorsión armónica en tensión ( $THDu$ ) después de implementar el filtro pasivo toma un valor de 4.77%, y la distorsión para cada armónico en voltaje se recoge la Fig. 29:



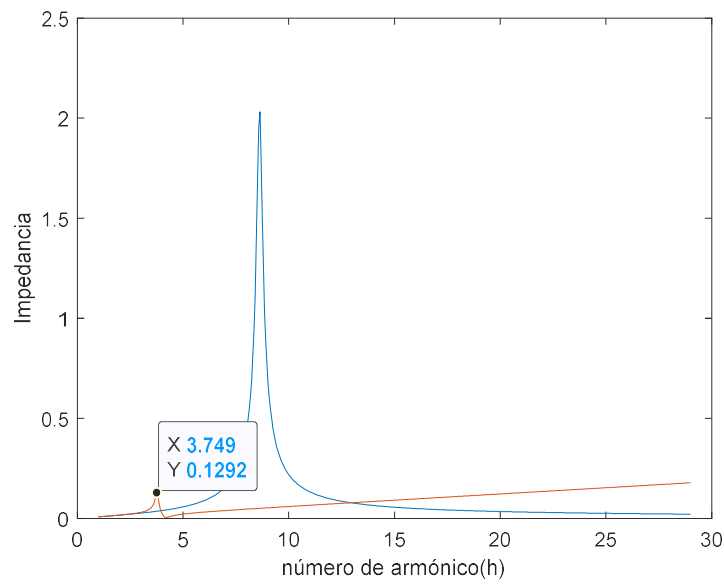
*Fig. 28 Desplazamiento de la frecuencia de resonancia por efecto del filtro pasivo.*



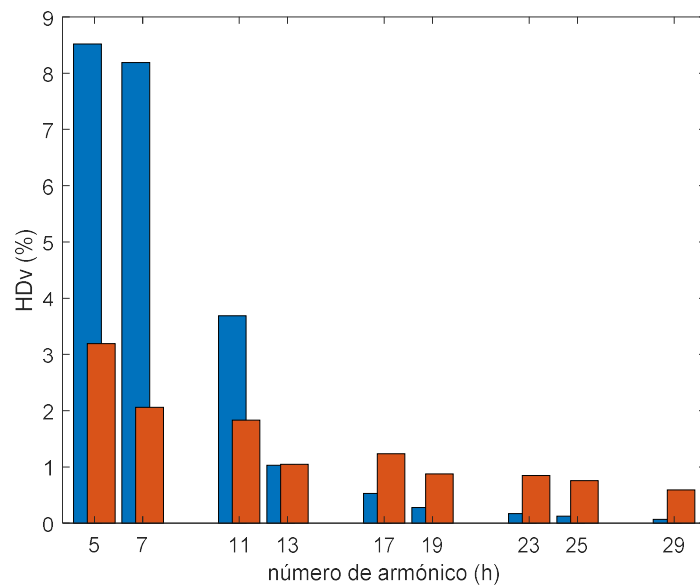
*Fig. 29 Distorsiones armónicas en tensión para cada armónico con el filtro pasivo.*

Comparando la impedancia del sistema y las distorsiones armónicas en tensión para cada armónico, sin filtro y con filtro, quedarían unos gráficos como los de la Fig. 30 y Fig. 31:





*Fig. 30 Frecuencia de resonancia sin filtro (azul) y con filtro (rojo).*



*Fig. 31 Caídas de tensión para cada armónico sin filtro (azul) y con filtro (rojo).*

Los resultados obtenidos muestran que:

- El pico de resonancia se desplaza a una frecuencia cercana a la de sintonización del filtro.
- El valor de la impedancia a la frecuencia de resonancia se reduce drásticamente.

- Alrededor de los 200Hz el filtro tiene un comportamiento inductivo y se comporta linealmente.
- La tasa de distorsión armónica disminuye considerablemente llegando a valores aceptables según anexo VII. Además se observa que para armónicos elevados, las caídas de tensión son mayores con filtro que sin filtro debido al comportamiento inductivo como se puede ver en la Fig. 28.
- Las distorsiones armónicas individuales se reducen de forma notable.

Mirando solamente  $THDu$  parecería que el filtro es apto, ya que no supera el límite del 5%. Ahora haría falta analizar como el valor de  $THDi=41\%$  tiene impacto en la instalación y muy concretamente en el transformador.

### 8.2.2. Impacto en el transformador

Para valorar el impacto que tienen los armónicos en un transformador se utiliza un parámetro llamado “factor K”. Este coeficiente representa la desviación armónica presente en el transformador respecto la situación ideal que sería cuando  $K=1$ . Este valor se relaciona con la capacidad (%) en la que trabaja el transformador como se observa en la Fig. 32:

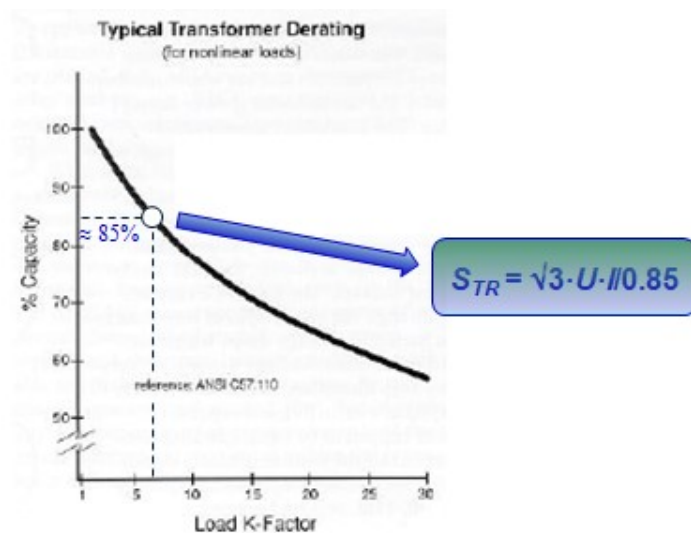


Fig. 32 K Factor - Capacidad de trabajo (%) [6]



La expresión para calcular este valor es:

$$K = \sum_{h=1}^{29} h^2 * i_h^2 (pu) \quad (8.15)$$

$I_1$	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$	$I_{17}$	$I_{19}$	$I_{23}$	$I_{25}$	$I_{29}$
898.7 A	338.81 A	120.43 A	64.08 A	30.65 A	27.41 A	17.35 A	13.84 A	11.41 A	7.64 A

*Tabla 22 Corrientes armónicas.*

El primer paso es conseguir reducir las intensidades en pu's:

$$i_h = \frac{I_h}{\frac{S_B}{\sqrt{3} * U}} \quad (8.16)$$

$i_1$	$i_5$	$i_7$	$i_{11}$	$i_{13}$	$i_{17}$	$i_{19}$	$i_{23}$	$i_{25}$	$i_{29}$
0,3891	0,1467	0,0521	0,0277	0,0133	0,0119	0,0075	0,0060	0,0049	0,0033

*Tabla 23 Corrientes armónicas en pu's*

Usando la fórmula 8.13 junto con los valores de la tabla Tabla 23 se obtiene un valor de  $K=1.05$ . Observando la Fig. 32 y considerando un coeficiente de  $K=1.05$ , se puede comprobar que la capacidad del transformador se reduciría tan poco que no sería remarcable. Aparte, el transformador está cargado solamente un 65% (ver apartado 4.2.6), por lo que en caso de mal funcionamiento del mismo, según los cálculos el origen no estaría en la presencia de corrientes armónicas.

Como conclusión este filtro analizado es apto para el TGBT-01 ya que  $THDu$  es inferior al 5% que la normativa vigente limita (anexo VII), y el transformador no se ve afectado por la tasa de distorsión armónica de corriente ( $THDi$ ).

### 8.3. TGBT-02

#### 8.3.1. Filtro pasivo

Escogiendo el modelo (VLVAF5P03518AB) que tiene una frecuencia de sintonización ( $K_{rs,F}$ ) de 190 Hz (orden 3,78), una potencia reactiva de 300 kVAr (ver anexo IX).

El valor de la reactancia capacitiva, inductiva y la resistencia del filtro se pueden obtener fácilmente usando el método del apartado 8.1.1:

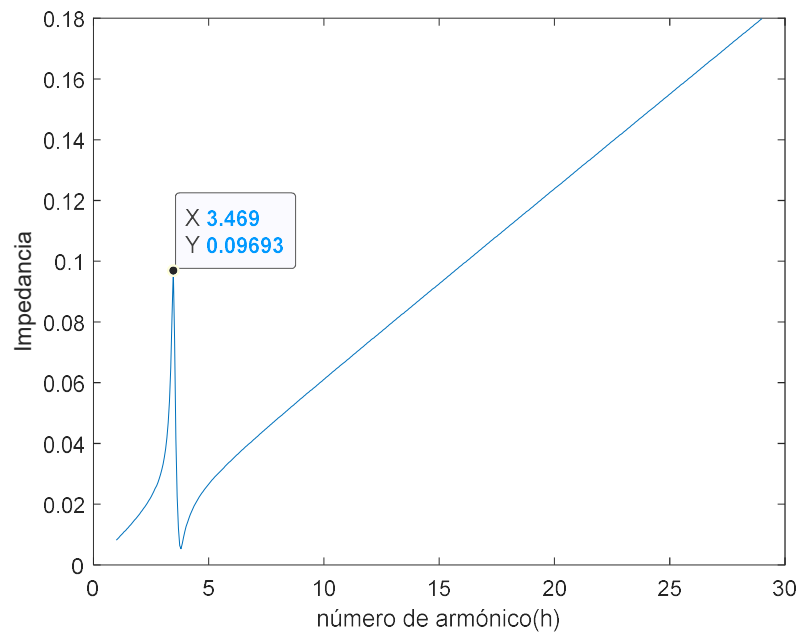
$$X_{C,1} = \frac{\left( \left( \sqrt{3} \frac{U}{\sqrt{3}} \right) * \frac{K_{rs,F}^2}{(K_{rs,F}^2 - 1)} \right)^2}{Q_{F,1}} = \frac{\left( \left( \sqrt{3} \frac{400}{\sqrt{3}} \right) * \frac{3.78^2}{(3.78^2 - 1)} \right)^2}{300000} = 0.6166 \, \Omega \quad (8.17)$$

$$X_{L,1} = \frac{X_{C,1}}{K_{rs,F}^2} = \frac{0.6166}{3.78^2} = 0.0432 \, \Omega \quad (8.18)$$

$$L = \frac{X_{L,1}}{100\pi} = 137.37 \, \mu H \quad (8.19)$$

$$R = \frac{K_{rs,F} * X_{L,1}}{q} = 0.0054 \, \Omega \quad (8.20)$$

Introduciendo los nuevos valores en la ecuación de la impedancia del sistema, la evolución de la impedancia sería como la de la Fig. 33:



*Fig. 33 Desplazamiento de la frecuencia de resonancia por efecto del filtro pasivo.*





El valor de la distorsión armónica en tensión ( $THDu$ ) después de implementar el filtro pasivo toma un valor de 4.72%, y la distorsión para cada armónico en voltaje se recoge la Fig. 34.

Comparando la impedancia del sistema y las distorsiones armónicas en tensión para cada armónico, sin filtro y con filtro, quedarían unos gráficos como los de la Fig. 35 y Fig. 36:

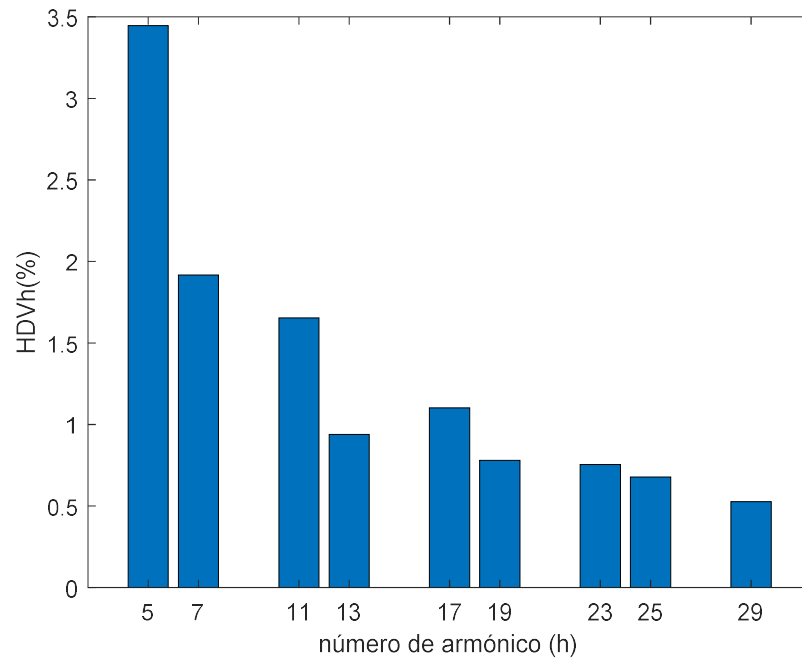


Fig. 34 Distorsiones armónicas en tensión para cada armónico con el filtro pasivo.

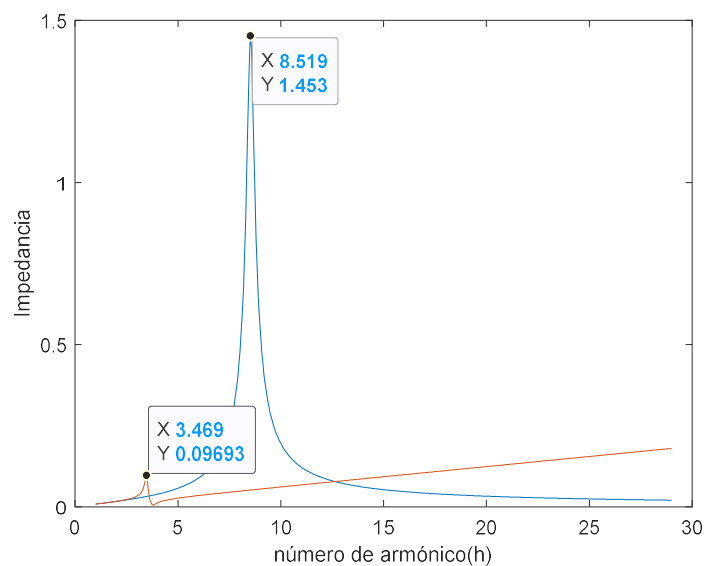
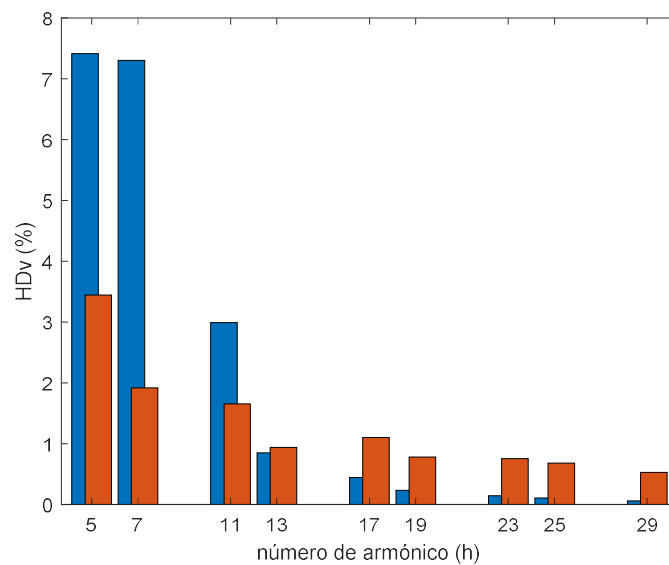


Fig. 35 Frecuencia de resonancia sin filtro (azul) y con filtro (rojo).



*Fig. 36 Caídas de tensión para cada armónico sin filtro (azul) y con filtro (rojo).*

Los resultados obtenidos muestran que:

- El pico de resonancia se desplaza a una frecuencia cercana a la de sintonización del filtro.
- El valor de la impedancia de resonancia se reduce drásticamente.
- Alrededor de los 200 Hz el filtro tiene un comportamiento inductivo y se comporta linealmente.
- La tasa de distorsión armónica disminuye considerablemente llegando a valores aceptables según anexo VII. Además se observa que para armónicos elevados, las caídas de tensión son mayores con filtro que sin filtro debido al comportamiento inductivo como se puede ver en la Fig. 33.
- Las distorsiones armónicas individuales se reducen de forma notable.

Mirando solamente  $THDu$  parecería que el filtro es apto, ya que no supera el límite del 5%. Aún así, igual que en el apartado 8.2.2 es necesario comprobar el impacto de las corrientes armónicas en el transformador.

Conociendo las corrientes adjuntadas en la Tabla 19, las corrientes armónicas en pu's:



$i_1$	$i_5$	$i_7$	$i_{11}$	$i_{13}$	$i_{17}$	$i_{19}$	$i_{23}$	$i_{25}$	$i_{29}$
0,3440	0,1297	0,0461	0,0245	0,0117	0,0105	0,0066	0,0053	0,0044	0,0029

*Tabla 24 Corrientes armónicas.*

Usando la fórmula 8.13 con los valores de la tabla Tabla 24 se obtiene un valor de  $K=0.82$ . Observando la Fig. 32 se puede comprobar que la capacidad del transformador no quedaría reducida por la presencia de corrientes armónicas. Aparte, el transformador está cargado 76% (ver apartado 4.2.6), por lo que en caso de mal funcionamiento del mismo, el origen no estaría en la presencia de corrientes armónicas.

Como conclusión este filtro analizado es apto para el TGBT-02 ya que  $THDu$  es inferior al 5% que la normativa vigente limita (anexo VII), y el transformador no se ve afectado por la tasa de distorsión armónica de corriente ( $THDi$ ).

## Conclusiones

En la ejecución del trabajo se ha realizado un estudio ordenado y sistemático de una instalación eléctrica. Se ha iniciado el trabajo analizando y presentando la instalación, a la vez que se ha aprovechado para introducir aquellas partes de la normativa más interesantes para el posterior dimensionado eléctrico de la misma. La presentación de la instalación eléctrica se ha limitado a presentar aquellos elementos que la hacen característica y que resultan interesantes para fases más avanzadas del proyecto. La normativa reguladora vigente ha sido extraída de documentos oficiales y manuales de fabricantes, ya que algunos fragmentos de la misma han sido actualizados con el paso de los años y estos manuales muchas veces son buenos atajos, para no tener que gastar cantidades económicas muy elevadas en la adquisición de las diferentes actualizaciones de la misma.

El dimensionado eléctrico de este proyecto, queda acotado al único dimensionado de los conductores eléctricos, para dar paso al posterior estudio de armónicos y las diferentes medidas para erradicar sus posibles efectos en los diferentes elementos que constituyen la instalación. Ambos cálculos son resultado de la programación de dos herramientas matemáticas muy distintas. Por un lado, el dimensionado eléctrico que se ha realizado usando Microsoft Excel que mediante cálculo y cruzado de datos, ha dado con resultados de manera personalizada para cada consumidor eléctrico. Y por otro lado, el estudio de armónicos mediante el entorno de cálculo Matlab, que ha requerido de una previa simplificación de la instalación, para una posterior programación del problema armónico y realización de los correspondientes cálculos con el fin de detectar la posible presencia de corrientes armónicas en la instalación. Se pone de manifiesto por lo tanto, la importancia de las dos herramientas de cálculo y su correcta programación. El resultado teórico calculado debe ser todo lo realista que sea posible debido a que en este proyecto no se dispone de datos experimentales para poder hacer una comparativa.

Los armarios eléctricos TGBT-03 y TGBT-04 frente a los dos restantes (TGBT-01 y TGBT-02), presentan diferencias importantes. Por un lado, en los dos primeros las componentes armónicas son mucho más significativas que en los dos últimos, es decir, las corrientes armónicas producidas por la presencia de variadores son mucho más elevadas. Y por otro lado, las frecuencias de resonancia en los dos primeros casos son muy diferentes respecto a los dos últimos. Estas diferencias tienen su origen en la reactancia capacitiva que tiene cada armario eléctrico.

Los armarios TGBT-03 y TGBT-04 muestran una tasa de distorsión armónica en tensión ( $THDu$ ) muy por encima de los valores admisibles según normativa. Esto es el resultado de



la combinación de una presencia de corrientes armónicas muy significativa y una resonancia en el séptimo armónico que obliga a tomar la decisión de valorar soluciones para reducir las componentes armónicas. Entre las diferentes opciones, el filtro pasivo sería la primera opción por defecto, debido a su bajo coste económico, pero no es suficiente para poner solución a la situación, debido a que la tasa de distorsión armónica en tensión se corrige considerablemente, pero no hasta valores aceptables según normativa. Por lo tanto, hace falta ir un paso más allá y optar por una solución más sofisticada aunque menos económica; el filtro activo. Este último soluciona de manera muy eficiente a pesar del sobre coste del mismo. Con la solución propuesta, se asegura también que los armónicos no tengan especial impacto en la instalación como podría ser calentamientos o disparos intempestivos de las protecciones eléctricas.

Los armarios TGBT-01 y TGBT-02, a pesar de ser dos armarios con cargas de naturaleza eléctrica muy diferentes, los resultados reflejan algunas similitudes. Por un lado está la localización de la resonancia, la cual se coloca en ambos casos entorno al noveno armónico y alcanza valores el doble de elevados respecto los dos armarios comentados con anterioridad. Esto es resultado de que la potencia de sus baterías de condensadores son de valor más reducido en comparación a TGBT-03 y TGBT-04. Este efecto a pesar de todo, tiene un impacto menor en el estudio de armónicos, ya que aquellos armónicos de corriente múltiplos de 3, se anulan al ser una instalación trifásica equilibrada. Por otro lado, las componentes armónicas alcanzan valores no tan significativos, debido a que la potencia total de aquellos consumidores que se alimentan con variador de velocidad, es mucho menor. Todo combinado, presenta unos valores de  $THDu$  no tan elevados como los dos casos anteriores, aunque si se hace necesario tomar medidas correctoras para reducir  $THDu$ . Para el caso del TGBT-01 es necesario un filtro que sintonice a 210 Hz mientras que en el TGBT-02, con uno que sintonice a 190Hz es suficiente. Además, el estudio del impacto de las corrientes armónicas en el transformador refleja que no hay reducción de la capacidad del mismo y por lo tanto refuerza que el uso del filtro pasivo es suficiente.

Para finalizar, se puede afirmar que en instalaciones eléctricas dónde la presencia de electrónica de potencia es muy elevada, la realización de un estudio de armónicos se hace necesaria. Además, la realización de tal estudio no es muy sofisticada, ya que teniendo cierta habilidad de cálculo y programación en números complejos y de programación, es posible llegar a resultados de manera eficiente y rápida.

## Agradecimientos

Agradecer al Dr. Luís Sainz su dedicación, la atención, su disponibilidad y sus aportaciones y sus conocimientos que han sido fundamentales en la realización de este proyecto.

Agradecer también a la empresa Ayesa haberme facilitado toda la documentación técnica.

## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] REBT 2002. *Reglamento electrotécnico para baja tensión e ITC*. Madrid: BOE, 2020.
- [2] GUÍA-BT-19. *Instalaciones interiores o receptoras. Preinscripciones generales*. BOE, 2009.
- [3] EL LIBRO BLANCO DE LA INSTALACIÓN. *Manual técnico y práctico de cables y accesorios para Baja Tensión*. Prysmian Group, Edición 2018
- [4] BOE-A-2001-20850. Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. Gobierno de España. p. 6-8. Noviembre de 2001.
- [5] *COMPENSACIÓ Y FILTRAJE*. Schneider.
- [6] SAINZ, L. *Calidad de suministro y integración de renovables en la red*. Barcelona: ETSEIB 2018
- [7] PEDRA, J. *Circuitos monofásicos y trifásicos*. Edicions UPC, Colección Aula ETSEIB. Barcelona 1999.
- [8] ITC-BT-47. Instalación de receptores Motores. BOE, 2002.